

**ТОМСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ**

ISSN (print) – 2500-1019
ISSN (on-line) – 2413-1830

**ИЗВЕСТИЯ
ТОМСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
ИНЖИНИРИНГ ГЕОРЕСУРСОВ**

Том 334, № 10, 2023

Издательство
Томского политехнического университета
2023

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Семилетов И.П., гл. редактор, д-р геогр. наук (Россия)
Остальд Р.В., канд. хим. наук (Россия)
Савичев О.Г., д-р геогр. наук (Россия)
Покровский О.С., канд. геол.-минерал. наук (Франция)
Старостенко В.И., д-р физ.-мат. наук (Украина)
Контарович А.Э., д-р геол.-минерал. наук (Россия)
Белозеров В.Б., д-р геол.-минерал. наук (Россия)
Никитенков Н.Н., д-р физ.-мат. наук (Россия)
Силкин В.М., д-р физ.-мат. наук (Испания)
Коротеев Ю.М., д-р физ.-мат. наук (Россия)
Уленев О.Н., д-р физ.-мат. наук (Россия)
Борисов А.М., д-р физ.-мат. наук (Россия)
Коршунов А.В., д-р хим. наук (Россия)
Пестряков А.Н., д-р хим. наук (Россия)
Тойпель У., Dsc (Германия)
Джин-Чун Ким, Dsc (Южная Корея)
Заворин А.С., д-р техн. наук (Россия)
Ханьялич К., Dsc (Нидерланды)
Маркович Д.М., д-р физ.-мат. наук (Россия)
Алексеев С.В., д-р физ.-мат. наук (Россия)
Воропай Н.И., д-р техн. наук (Россия)
Кочегуров А.И., канд. техн. наук (Россия)
Руи Д., PhD (Португалия)
Зиатдинов Р.А., канд. физ.-мат. наук (Южная Корея)
Спицын В.Г., д-р техн. наук (Россия)
Муравьев С.В., д-р техн. наук (Россия)
Пойлов В.З., д-р техн. наук (Россия)
Лотов В.А., д-р техн. наук (Россия)
Софронов В.Л., д-р хим. наук (Россия)
Бузник В.М., д-р хим. наук (Россия)
Захаров Ю.А., д-р хим. наук (Россия)
Антипенко В.Р., д-р хим. наук (Россия)
Голик В.И., д-р техн. наук (Россия)
Абуталипова Е.М., д-р техн. наук (Россия)
Полищук В.И., д-р техн. наук (Россия)
Хамитов Р.Н., д-р техн. наук (Россия)
Зюев А.М., д-р техн. наук (Россия)
Третьяк А.Я., д-р техн. наук (Россия)
Арбузов С.И., д-р геол.-минерал. наук (Россия)
Ковалев В.З., д-р техн. наук (Россия)
Романенко С.В., д-р хим. наук (Россия)
Кириянова Л.Г., канд. филос. наук (Россия)
Строкова Л.А., д-р геол.-минерал. наук (Россия)
Мазуров А.К., д-р геол.-минерал. наук (Россия)
Мостовщиков А.В., д-р техн. наук (Россия)
Хакимьянов М.И., д-р техн. наук (Россия)
Боярко Г.Ю., д-р экон. наук, канд. геол.-минерал. наук (Россия)
Стрижак П.А., д-р физ.-мат. наук (Россия)
Глазырин А.С., выпуск. редактор, д-р техн. наук (Россия)

Входит в Перечень ВАК РФ – ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук.

Подписной индекс в объединённом каталоге «Пресса России» – 18054

© ФГАОУ ВО НИ ТПУ, 2023

УВАЖАЕМЫЕ ЧИТАТЕЛИ!

Журнал «Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов» – рецензируемый научный журнал, издающийся с 1903 года.

Учредителем является Томский политехнический университет.

Журнал зарегистрирован Министерством Российской Федерации по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций – Свидетельство ПИ № ФС 77-65008 от 04.03.2016 г.

ISSN (print) – 2500-1019
ISSN (on_line) – 2413-1830

«Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов» публикует оригинальные работы, обзорные статьи, очерки и обсуждения, охватывающие последние достижения в области геологии, разведки и добычи полезных ископаемых, технологии транспортировки и глубокой переработки природных ресурсов, энергоэффективного производства и преобразования энергии на основе полезных ископаемых, а также безопасной утилизации геоактивов.

Журнал представляет интерес для геологов, химиков, технологов, физиков, экологов, энергетиков, специалистов по хранению и транспортировке энергоресурсов, ИТ-специалистов, а также ученых других смежных областей.

Тематические направления журнала «Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов»:

- Прогнозирование и разведка георесурсов
- Добыча георесурсов
- Транспортировка георесурсов
- Глубокая переработка георесурсов
- Энергоэффективное производство и преобразование энергии на основе георесурсов
- Безопасная утилизация георесурсов и вопросы геоэкологии
- Инженерная геология Евразии и окраинных морей

К публикации принимаются статьи, ранее нигде не опубликованные и не представленные к печати в других изданиях.

Статьи, отбираемые для публикации в журнале, проходят закрытое (слепое) рецензирование.

Автор статьи имеет право предложить двух рецензентов по научному направлению своего исследования.

Окончательное решение по публикации статьи принимает главный редактор журнала.

Все материалы размещаются в журнале на бесплатной основе.

Журнал издается ежемесячно.

Полнотекстовый доступ к электронной версии журнала возможен на сайтах www.elibrary.ru, scholar.google.com



**TOMSK
POLYTECHNIC
UNIVERSITY**

ISSN (print) – 2500_1019
ISSN (on_line) – 2413_1830

**BULLETIN
OF THE TOMSK POLYTECHNIC UNIVERSITY
GEO ASSETS ENGINEERING**

Volume 334, № 10, 2023

Tomsk Polytechnic University Publishing House
2023

EDITORIAL BOARD

Semiletov I.P., editor in chief, Dr. Sc. (Russia)
Ostvald R.V., Cand. Sc. (Russia)
Savichev O.G., Dr. Sc. (Russia)
Pokrovsky O.S., Cand. Sc. (France)
Starostenko V.I., Dr. Sc. (Ukraine)
Kontorovich A.E., Dr. Sc. (Russia)
Belozarov V.B., Dr. Sc. (Russia)
Nikitenkov N.N., Dr. Sc. (Russia)
Silkin V.M., PhD (Spain)
Koroteev Yu.M., Dr. Sc. (Russia)
Ulenekov O.N., Dr. Sc. (Russia)
Borisov A.M., Dr. Sc. (Russia)
Korshunov A.V., Dr. Sc. (Russia)
Pestryakov A.N., Dr. Sc. (Russia)
Teipel U., Dsc (Germany)
Jin-Chun Kim, Dsc (South Korea)
Zavorin A.S., Dr. Sc. (Russia)
Hanjalic K., Dsc (Netherlands)
Markovich D.M., Dr. Sc. (Russia)
Aleksenko S.V., Dr. Sc. (Russia)
Voropai N.I., Dr. Sc. (Russia)
Kochegurov A.I., Cand. Sc. (Russia)
Rui D., PhD (Portugal)
Ziatdinov R.A., Cand. Sc. (South Korea)
Muravyov S.V., Dr. Sc. (Russia)
Spitsyn V.G., Dr. Sc. (Russia)
Poilov V.Z., Dr. Sc. (Russia)
Lotov V.A., Dr. Sc. (Russia)
Sofronov V.L., Dr. Sc. (Russia)
Bouznik V.M., Dr. Sc. (Russia)
Zakharov Yu.A., Dr. Sc. (Russia)
Antipenko V.R., Dr. Sc. (Russia)
Golik V.I., Dr. Sc. (Russia)
Abutalipova E.M., Dr. Sc. (Russia)
Polishchuk V.I., Dr. Sc. (Russia)
Khamitov R.N., Dr. Sc. (Russia)
Zyuzev A.M., Dr. Sc. (Russia)
Tretiak A.Ya., Dr. Sc. (Russia)
Arbuzov S.I., Dr. Sc. (Russia)
Kovalev V.Z., Dr. Sc. (Russia)
Romanenko S.V., Dr. Sc. (Russia)
Kiryanova L.G., Cand. Sc. (Russia)
Strokova L.A., Dr. Sc. (Russia)
Mazurov A.K., Dr. Sc. (Russia)
Mostovshchikov A.V., Dr. Sc. (Russia)
Khakimyanov M.I., Dr. Sc. (Russia)
Boyarko G.Yu., Dr. Sc., Cand. Sc. (Russia)
Strizhak P.A., Dr. Sc. (Russia)
Glazyrin A.S., managing editor, Dr. Sc. (Russia)

AIMS AND SCOPES

Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering is peer-reviewed journal owned by Tomsk Polytechnic University.

The journal was founded in 1903.

The journal is registered internationally (ISSN 2413-1830) and nationally (Certificate PE no. FM 77-65008, March 04, 2016 from the RF Ministry of Press, Broadcasting and Mass Communicationss).

ISSN (print) – 2500-1019

ISSN (on-line) – 2413-1830

The journal publishes research papers in the field defined as "life cycle of georesources". It presents original papers, reviews articles, rapid communications and discussions covering recent advances in geology, exploration and extraction of mineral resources, transportation technologies and deep processing of natural resources, energy-efficient production and energy conversion based on mineral resources as well as on safe disposal of geo assets.

The journal will be of interest to geologists, chemists, engineers, physicists, ecologists, power engineers, specialists in storage and transportation of energy resources, IT specialists as well as to other specialists in the related fields.

Scope of the journal issue "Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering" in accordance with Geo Assets (GA) strategy includes:

- Geo Assets exploration and refining;
- Geo Assets mining and transportation;
- Geo Assets deep processing;
- Energy-efficient production and conversion of energy based on Geo Assets;
- Safe disposal of Geo Assets and Geoecology issues;
- Geo-engineering of Eurasia and marginal sea;
- Economic and social aspects of using Geo Assets.

Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering publishes only original research articles. All articles are peer reviewed by international experts. Both general and technical aspects of the submitted paper are reviewed before publication. Authors are advised to suggest two potential reviewers who are familiar with the research focus of the article. Final decision on any paper is made by the Editor in Chief.

Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering is published monthly.

The publication of manuscripts is free of charge.

The journal is on open access on
www.elibrary.ru, scholar.google.com.

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENTS

- Оценка эффективности методов электрокаротажа при изучении герметичности обсадных колонн в скважинах урановых месторождений**
Шарапатов А., Асирбек Н.А., Саманбетов Н.З.
- Геохимические условия источника межмерзлотных вод Суллар: вторичное минералообразование и потоки метана**
Солдатова Е.А., Сидкина Е.С., Кирюхин Б.А., Максимов П.Н., Кривенок Л.А., Иванов В., Тананаев Н.И.
- Транспорт шлама буровым раствором в горизонтальных скважинах. Часть 1. Моделирование структуры дисперсных течений**
Харламов С.Н., Джангорбани М., Зайковский В.В.
- Вторичные ресурсы в производстве композиционных строительных материалов на основе цемента**
Копаница Н.О., Демьяненко О.В., Куликова А.А., Ткач Е.В., Шестаков Н.И., Степина И.В.
- Исследование условий образования газогидратных и асфальтосмолопарафиновых отложений при добыче нефти механизированным способом**
Коробов Г.Ю., Воронцов А.А.
- О необходимости комплексной геоэкологической оценки техногенно нарушенных горными работами земель**
Гаврилов В.Л., Немова Н.А., Резник А.В., Косарев Н.С., Колесников А.А.
- Использование метода динамического рассеяния света для оценки эффективности разделения взвешенных и коллоидных частиц речных вод фильтрацией и центрифугированием**
Шулькин В.М.
- Технология 3D-моделирования начальной нефтенасыщенности в переходной водонефтяной зоне по комплексу методов капилляриметрии и электрического каротажа**
Потехин Д.В., Ширяев Е.О., Галкин С.В.
- Цифровой керн: влияние температурного поля на двухфазную фильтрацию флюидов в горной породе**
Катанов Ю.Е., Ягафаров А.К., Аристов А.И.
- Первый опыт зонального прогноза Московского артезианского бассейна для реализации проектов CCS**
Новиков Д.А., Фомина (Садыхова) Я.В., Юрчик И.И., Деркачев А.С., Черных А.В., Дульцев Ф.Ф., Максимова А.А., Никитенков А.Н., Князев А.Г.
- Опыт создания стендов для испытаний железобетонных конструкций ответственных объектов нефтегазового комплекса**
Однокопылов Г.И., Саркисов Д.Ю.
- Закономерности формирования регионального уранового статуса на примере Республики Башкортостан**
Злобина А.Н., Фархутдинова Л.М., Фархутдинов И.М., Беляновская А.И., Барановская Н.В., Чесалова Е.И., Фархутдинов А.М., Хайрулина Л.А., Крестьянникова Е.В.
- Оценка возможности использования отработанного турбинного масла в буровом растворе в качестве смазывающей добавки**
Ламбин А.И., Аверкина Е.В., Ерыгина А.Н., Аверкин Н.А.
- 7 Evaluation of the efficiency of electric logging methods when studying tightness of casing strings in wells of uranium deposits**
Sharapatov A., Assirbek N., Samanbetov N.
- 16 Geochemical conditions of Sullar spring: formation of authigenic minerals and methane fluxes**
Soldatova E.A., Sidkina E.S., Kiriukhin B.A., Maximov P.N., Krivenok L.A., Ivanov V., Tananaev N.I.
- 34 Transportation of cuttings by drilling mud in horizontal wells. Part 1. Modeling the structure of dispersed currents**
Kharlamov S.N., Janghorbani M., Zaykovskiy V.V.
- 49 Secondary resources in production of composite building materials based on cement**
Kopanitsa N.O., Demyanenko O.V., Kulikova A.A., Tkach E.V., Shestakov N.I., Stepina I.V.
- 61 Study of conditions for gas hydrate and asphaltene-resin-paraffin deposits formation in mechanized oil production**
Korobov G.Yu., Vorontsov A.A.
- 76 On the need for a comprehensive geoeological assessment of lands disturbed by mining**
Gavrilov V.L., Nemova N.A., Reznik A.V., Kosarev N.S., Kolesnikov A.A.
- 88 Use of the dynamic light scattering to assess the efficiency of separation of suspended and colloidal particles in river waters by filtration and centrifugation**
Shulkin V.M.
- 98 3D-modeling technology of initial oil saturation in transitional oil-water zone by complex of capillarimetry and electric logging methods**
Potekhin D.V., Shiryayev E.O., Galkin S.V.
- 108 Digital core: temperature field influence on two-phase filtration of fluids in rocks**
Katanov Yu.E., Yagafarov A.K., Aristov A.I.
- 119 First experience in zonal forecast over the Moscow artesian basin for implementation of CCS projects**
Novikov D.A., Fomina (Sadykova) Ya.V., Yurchik I.I., Derkachev A.S., Chernykh A.V., Dultsev F.F., Maksimova A.A., Nikitenkov A.N., Knyazev A.G.
- 140 Experience in creating stands for testing reinforced concrete structures of critical oil and gas facilities**
Odnokopylov G.I., Sarkisov D.Yu.
- 153 Patterns of the regional uranium status formation on the example of the Republic of Bashkortostan**
Zlobina A.N., Farkhutdinova L.M., Farkhutdinov I.M., Belyanovskaya A.I., Baranovskaya N.V., Chesalova E.I., Farkhutdinov A.M., Khayrulina L.A., Krestyannikova E.V.
- 169 Evaluation of the possibility of using spent turbine oil as a lubricating additive in drilling mud**
Lambin A.I., Averkina E.V., Erygina A.N., Averkin N.A.

- | | | |
|---|--|---|
| <p>Алгоритм обоснования выбора объектов для внедрения инновационных технологий добычи нефти в условиях нижнемеловых отложений Западной Сибири
 Мухаметшин В.В., Кулешова Л.С.</p> <p>Изменения гидрогеологических условий при заболачивании юго-востока Западно-Сибирской равнины
 Савичев О.Г.</p> <p>Настройка резонансных режимов работы ультразвукового излучателя при одностороннем доступе к объекту
 Азин А.В., Богданов Е.П., Васильев А.В., Пономарев С.А., Пономарев С.В., Рикконен С.В.</p> <p>Возможность извлечения урана из отработавшего ядерного топлива в расплавленных электролитах, содержащих редкие элементы
 Никитин Д.И., Половов И.Б., Ребрин О.И.</p> <p>Разработка и настройка наблюдателя полного порядка для электротехнического комплекса «кабельная линия – асинхронный двигатель»
 Раков И.В., Глазырин А.С., Кладиев С.Н.</p> <p>Определение параметров оптимальной сети наблюдения для картирования палеорусла методом электротомографии на основе численного и физического моделирования
 Осипова П.С., Оленченко В.В., Чекрыжов А.В.</p> <p>Особенности изменения химического состава питьевой воды в результате водоподготовки (с. Ловозеро, Кольский полуостров)
 Мазухина С.И., Дрогобужская С.В., Сандимиров С.С., Маслобоев В.А.</p> | <p>179</p> <p>187</p> <p>199</p> <p>210</p> <p>219</p> <p>232</p> <p>243</p> | <p>Algorithm for substantiating facilities selection for introduction of oil production innovative technologies in the conditions of the lower cretaceous deposits of Western Siberia
 Mukhametshin V.V., Kuleshova L.S.</p> <p>Changes in hydrogeological conditions during bogging in the southeast of the West Siberian plain
 Savichev O.G.</p> <p>Configurations of ultrasonic emitter resonance modes for unilateral access to an object
 Azin A.V., Bogdanov E.P., Vasilyev A.V., Ponomarev S.A., Ponomarev S.V., Rikkonen S.V.</p> <p>Possibility of uranium extraction from spent nuclear fuel in fused electrolytes containing rare elements
 Nikitin D.I., Polovov I.B., Rebrin O.I.</p> <p>Development and configuration of a full-order observer for «cable line – induction motor» electrical complex
 Rakov I.V., Glazyrin A.S., Kladiev S.N.</p> <p>Determination of optimal observation network parameters for mapping paleochannel by the electrical resistivity tomography method based on numerical and physical modeling
 Osipova P.S., Olenchenko V.V., Chekryzhov A.V.</p> <p>Features of changes in chemical composition of drinking water as a result of water treatment (Lovozero, Kola Peninsula)
 Mazukhina S.I., Drogobuzhskaya S.V., Sandimirov S.S., Masloboev V.A.</p> |
|---|--|---|

УДК 553.495:550.832.7:622.245.01

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТОДОВ ЭЛЕКТРОКАРОТАЖА ПРИ ИЗУЧЕНИИ ГЕРМЕТИЧНОСТИ ОБСАДНЫХ КОЛОНН В СКВАЖИНАХ УРАНОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Шарапатов Абиш¹,
a.sharapatov@satbayev.university

Асирбек Назерке Асирбеккызы¹,
n.assirbek@stud.satbayev.university

Саманбетов Нурлан Зейноллаевич¹,
n.samanbetov@stud.satbayev.university

¹ Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева,
Казахстан, А15М8С4 (050013), г. Алматы, ул. Сатпаева, 22.

Актуальность. При эксплуатации месторождений урана способом подземного скважинного выщелачивания возникает множество проблемных вопросов. Среди них можно выделить нарушение целостности и герметичности полимерной обсадной колонны, что приводит к утечке растворов по дефектам и резьбовым соединениям, кольматации и др. С помощью геофизических исследований скважин, а именно токового каротажа и каротажа кажущегося электрического сопротивления, имеется технологическая возможность получить фактические данные об утечках растворов в околоскважинное пространство (их расположение, величина). Распространение растворов в затрубное пространство приводит к технологическим и геозологическим нарушениям при освоении месторождений.

Цель: сравнительная оценка эффективности токового каротажа и каротажа кажущегося электрического сопротивления при решении технологических задач – оценке целостности полимерных труб и герметичности резьбовых соединений в обсадной колонне урановых скважин и определению параметров ликвидации скважин с поврежденными колоннами на основе данных токового каротажа или каротажа кажущегося электрического сопротивления в обсадке.

Объекты: искусственные дефекты в обсадной колонне для проведения экспериментальных работ: отверстия в трубах с разными диаметрами и расположениями, негерметичные соединения обсадных труб.

Методы и методика. Работа выполнена на одном из участков уранового месторождения Шу-Сарысуской провинции и включает следующие мероприятия: подготовка полимерных обсадных колонн для проведения эксперимента; физико-техническое обоснование применения методов геофизических исследований скважин для изучения проблемы; выполнение измерительных работ методами токового каротажа и каротажа кажущегося электрического сопротивления; проведение вычислительных работ с применением показаний токового каротажа, каротажа кажущегося электрического сопротивления и получение значений вероятностного параметра для оценки состояния обсадных колонн и принятия решения по эксплуатации скважин; сравнительный анализ и составление выводов по информативности скважинных геофизических (электрических) методов.

Результаты. Итоги работы показали, что для решения задачи контроля технического состояния обсадных колонн оптимальным является применение метода каротажа кажущегося электрического сопротивления. Выводы исследований составлены по итогам анализа характера изменения диаграмм электрических методов методами токового каротажа и каротажа кажущегося электрического сопротивления, чувствительности измеряемых значений электрического поля к дефектам в обсадной колонне. Количественные значения параметра % АНО – величина утечки тока (аномалии), полученные расчетным путем по данным методами токового каротажа и самопроизвольной поляризации носят вероятностный характер. Они позволили разработать рекомендации для принятия технологического и/или управленческого решения по состоянию обсадных колонн и дальнейшему использованию эксплуатационных скважин с разными дефектами в них.

Ключевые слова:

Урановые месторождения, целостность и герметичность обсадных колонн, полимерные трубы, токовый каротаж, каротаж кажущегося электрического сопротивления, оптимальный метод ГИС.

Введение

В общем объеме минерально-сырьевой базы Казахстана весомой долей обладают урановые месторождения. В открытых источниках имеются сведения о производстве урана в мире, в том числе в Казахстане [1]. Они в стране разрабатываются с 70-х гг. прошлого века. Самой крупной урановорудной провинцией в масштабе страны является Шу-Сарысуский район. О геологических характеристиках месторождений урана района, включая закономерности их размещения и типы оруденения, опубликованы множество научных трудов отечественных и зарубежных исследователей [2–4]. Самыми технологичными и рентабельными для отработки рудных залежей явля-

ются экзогенные (пластово-инфильтрационного гидротермального типа) месторождения урана с применением прогрессивного и безопасного способа подземного скважинного выщелачивания (ПСВ) [5–8].

При изучении месторождений полезных ископаемых особое место отводится геофизическим методам исследования скважин (ГИС) – каротажу, операциям в скважинах и скважинной геофизике [9–11]. На урановых месторождениях роль ГИС связана с 1) сооружением подавляющего большинства скважин без отбора керна и 2) обеспечением безопасности работ в радиационной среде. То есть данные ГИС являются практически единственной информационной поддержкой при решении разведочных, геотехнологиче-

ских и других задач: от литологического расчленения разреза и контроля технического состояния эксплуатируемых скважин до их ликвидации после отработки месторождений [12–15]. Выбор конкретных методов ГИС (электрических, радиометрических и других) и использование их данных на разных этапах изучения и освоения урановых месторождений определяются отраслевыми нормативными документами и инструкциями технического и опытно-методического характера.

Актуальным является вопрос постоянного совершенствования методики выбора оптимального метода ГИС для решения каждой геолого-технологической задачи. Одной из таких задач является контроль за целостностью труб и герметичностью обсадных колонн в урановых скважинах. Важность контроля заключается в том, что он выявляет нарушение геотехнологических процедур и геоэкологических норм при освоении месторождений – утечка растворов в околоскважинное пространство, что вызывает опасность поступления химических веществ в различные горизонты геологического разреза [8, 16–18].

Метод и методика определения информативного электрического метода ГИС

Был проведен тест в опытной гидрогеологической скважине уранового месторождения. На данной скважине при сооружении в целях эксперимента на полимерных обсадных колоннах были просверлены

отверстия различного диаметра, чтобы выявить чувствительность скважинных приборов токового каротажа (ТК) и каротажа кажущегося электрического сопротивления (КС) на имеющихся аномалиях вдоль колонны (рис. 1).

При использовании заранее известных данных были протестированы пять различных конфигураций размещения отверстий:

- **T1** – на данном участке обсадной колонны просверлены отверстия в середине диаметром $\varnothing=1, 2, 3, 5$ и 10 мм. Этим участком трубы обсажен интервал глинистых пород.
- **T2** – на месте соединения данного участка обсадной трубы с другими частями клей не был нанесен.
- **T3** – с четырех противоположных сторон на данном участке обсадной трубы в средней части просверлены отверстия диаметром $\varnothing=1, 3$ и 5 мм, чтобы увеличить контакт с поверхностью между внутренними и внешними обсадными трубами.
- **T4** – просверлены два отверстия с противоположных сторон на расстоянии $1/3$ и $2/3$ на каждой обсадной трубе диаметром $\varnothing=1, 3$ и 5 мм, чтобы проверить влияние расположения скважинного прибора на обсадную колонну.
- **T5** – просверлено одно отверстие на каждой обсадной трубе диаметром $\varnothing=1, 2, 3, 5$ и 10 мм, в средней части на интервале песчаных пород (рис. 1, 2).

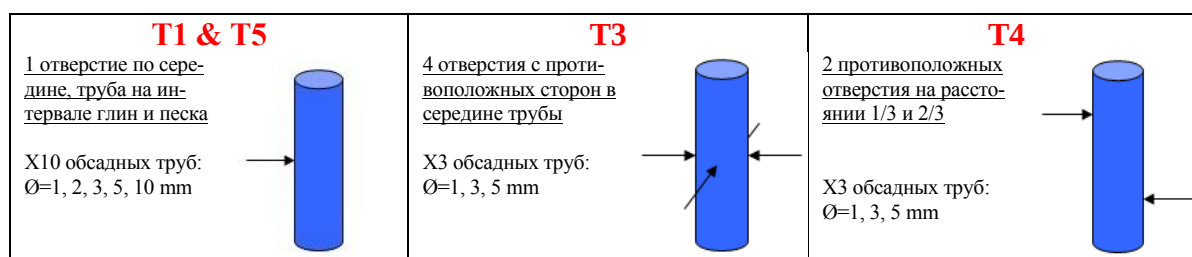


Рис. 1. Место расположения известных отверстий на обсадных трубах

Fig. 1. Location of known holes on casing pipes

В целом информативность геофизических методов определяется их физическими основами, аппаратно-методическими возможностями и/или физико-геологическими условиями геологического разреза: дифференциация значений, соответствующих методу физическим свойствам изучаемых объектов, проявление их в наблюдаемых геофизических полях [19, 20]. В рамках данного исследования при выборе электрических методов ГИС также учитывались физические принципы действия ТК, КС и производственный опыт рабочей группы.

При исследовании разрезов скважин с одноэлектродной установкой методом регистрации тока горные породы изучаются по данным измерения полного сопротивления заземления питающего электрода А (R_A), путем измерения силы тока (I), проходящего через это заземление и находящегося в обратной зависимости от сопротивления заземления R_A .

В однородном безграничном пространстве (при отсутствии контактного сопротивления) сопротивле-

ние заземления R пропорционально удельному электрическому сопротивлению ρ среды, в которой находится заземление, и зависит от его размеров и формы.

Электропроводность полимерных обсадных труб на несколько порядков ниже электропроводности горных пород, слагающих геологический разрез скважин. Именно этим обстоятельством и определяется то, что места нарушения гидроизоляции и фильтровая часть колонны обсадных труб на диаграммах токового каротажа отмечаются контрастными аномалиями изменения тока в цепи АВ.

Физическими предпосылками подобного рода исследований служит то, что полимерная труба является хорошим изолятором и любая электролитическая связь между жидкостью внутри обсадной колонны и поровой жидкостью горной породы вне её может свидетельствовать о нарушении целостности обсадной колонны. По сути, и токовый каротаж и КС в обсадке фиксируют изменение сопротивления в зоне подвижного электрода.

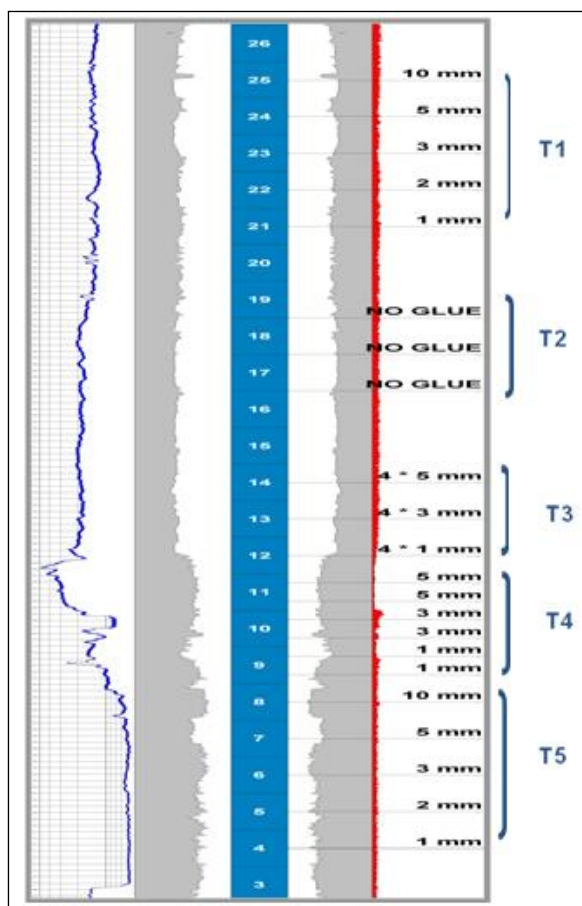


Рис. 2. Место расположения известных отверстий на обсадных трубах в скважине (конструкция скважины: синим цветом в центре указана обсадная колонна; слева – диаграмма КС, потенциал-зонд)

Fig. 2. Location of the known holes on the column pipes in the well (well design: casing is indicated in blue in the center; on the left – resistivity logging (RL) diagram, potential-probe)

КС в обсадке выполняют специально изготовленным малым электрозондом типа (A0,1M0,1N) с целью локализации места нарушения. Форма аномалии от порыва колонны на диаграмме будет отображена увеличением тока на диаграмме ТК и минимумом сопротивления на диаграммах КС. При всей своей простоте интерпретация полученных диаграмм является неоднозначной. Если определение положения крупных нарушений обсадной колонны, какими, например является фильтр, сомнений не вызывают, то мелкие аномалии (менее 20 % от максимальной амплитуды) всегда склоняют к размышлениям.

Исходя из вышепредставленных материалов использованы следующие параметры, которые могут быть основанием для ликвидации скважины по результатам каротажа методом КС в обсадке или ТК.

В ходе расчета использовался обычный метод калькуляции:

$$\%ANO = \frac{[Max(ANO) - Bckgr]}{[Max(Screen) - Bckgr]} \cdot 100 \%,$$

где % ANO – величина утечки тока (аномалии); $Max(ANO)$ – максимальное значение утечки тока (аномалии); $Max(Screen)$ – максимальное значение в интервале фильтра; $Bckgr$ – среднее фоновое значение.

Результаты

В ходе эксперимента при проведении каротажа методом КС в обсадке были получены следующие результаты: на обсадных трубах **T1–T5** на отверстиях с диаметром от 3 до 10 мм утечки тока обнаруживались систематически, отверстия диаметром от 1 до 2 мм зачастую не записывались как аномалия, что зависело от калибровки прибора, но проявлялись на небольшом диапазоне от фонового значения по стволу скважины; на обсадной трубе **T2** было видно, что клей на резьбовых частях нанесли в недостаточном количестве (рис. 3).

При проведении каротажа методом ТК полученные данные между каротажными измерениями менялись. На обсадных трубах **T1–T5** отверстия диаметром от 3 до 10 мм были заметны с малой вероятностью, отверстия диаметром от 1 до 2 мм по кривой не наблюдались и по сравнению с КС в обсадке имели худшую информативность. На обсадной трубе **T2** отсутствие клея было не совсем очевидно (рис. 4).

Выводы для принятия решения о техническом состоянии обсадной колонны по данным КС:

1. При диаметре отверстия больше чем 2 мм имеется 100 % вероятность того, что скважина будет ликвидирована.
2. При диаметре отверстия около 2 мм имеется 66 % вероятность того, что скважина будет ликвидирована.
3. При диаметре отверстия около 1 мм имеется 17 % вероятность того, что скважина будет ликвидирована.
4. Отсутствие клея на резьбовых соединениях обсадных труб имеет 78 % вероятность того, чтобы выставить штрафные санкции.

Выводы для принятия решения о техническом состоянии обсадной колонны по данным ТК:

1. Ни при каком диаметре отверстий нет 100 % вероятности того, что скважина подлежит ликвидации.
2. При диаметре отверстия более 2 мм имеется 55 % вероятность того, что скважина будет ликвидирована.
3. При диаметре отверстия менее 3 мм скважина не будет ликвидирована – нет оснований на ликвидацию.
4. Отсутствие клея на резьбовых соединениях обсадных труб имеет 0 % вероятность того, что будут выставлены штрафные санкции.

Наиболее частыми причинами, выявляемыми аномалиями ТК, являются низкое качество обсадных труб и плохая герметизация резьбовых соединений при сооружении скважины. Для окончательного заключения о целостности обсадной колонны необходимо проведение дополнительных исследований с привлечением расходомерии для вновь сооружаемых скважин или индукционного каротажа для скважин, находящихся в эксплуатации длительное время.

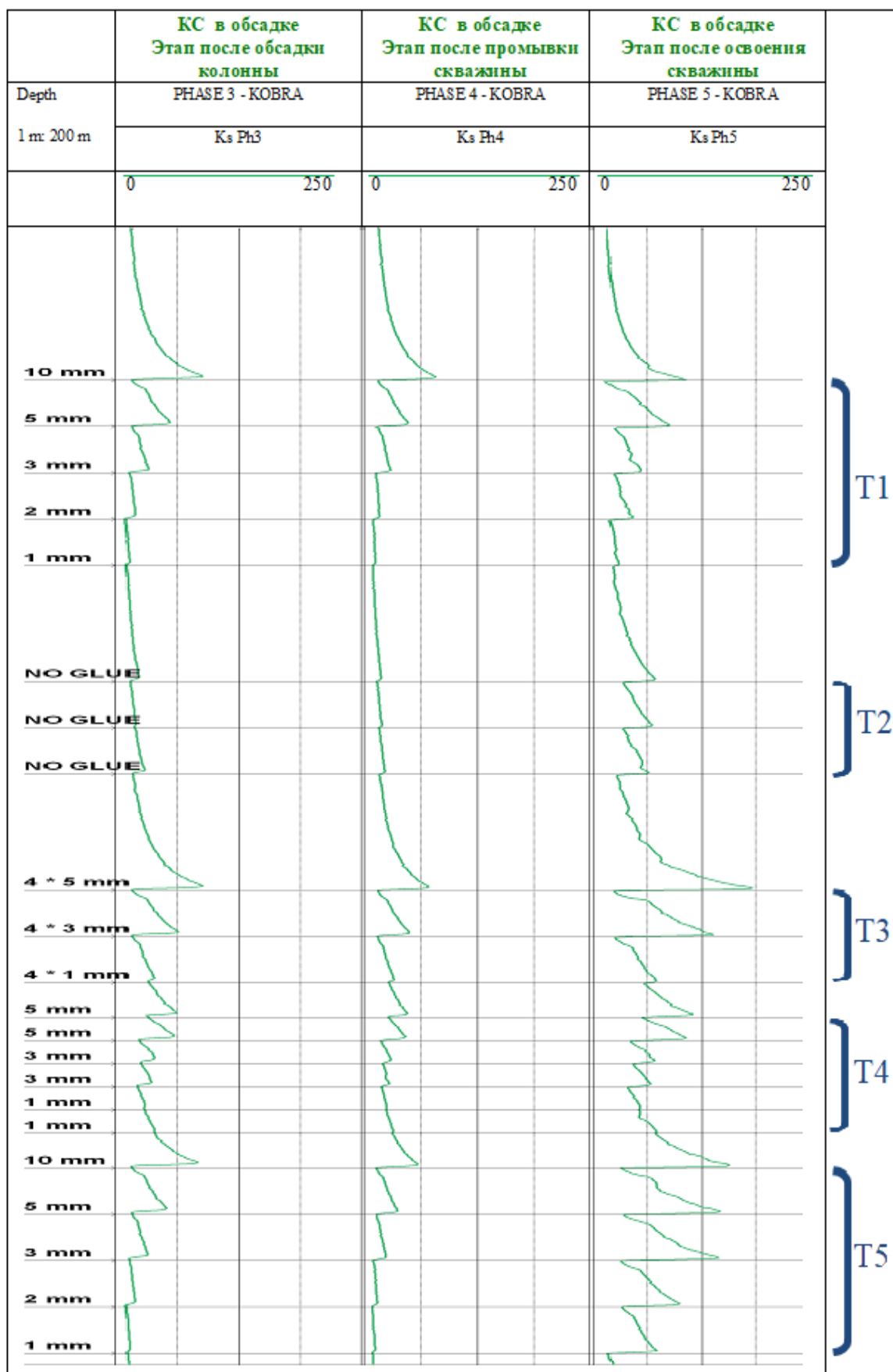


Рис. 3. Кривые каротажа КС в обсадных колонах на разных этапах сооружения скважины

Fig. 3. Electrical resistivity logging curves in the casing at different stages of well construction

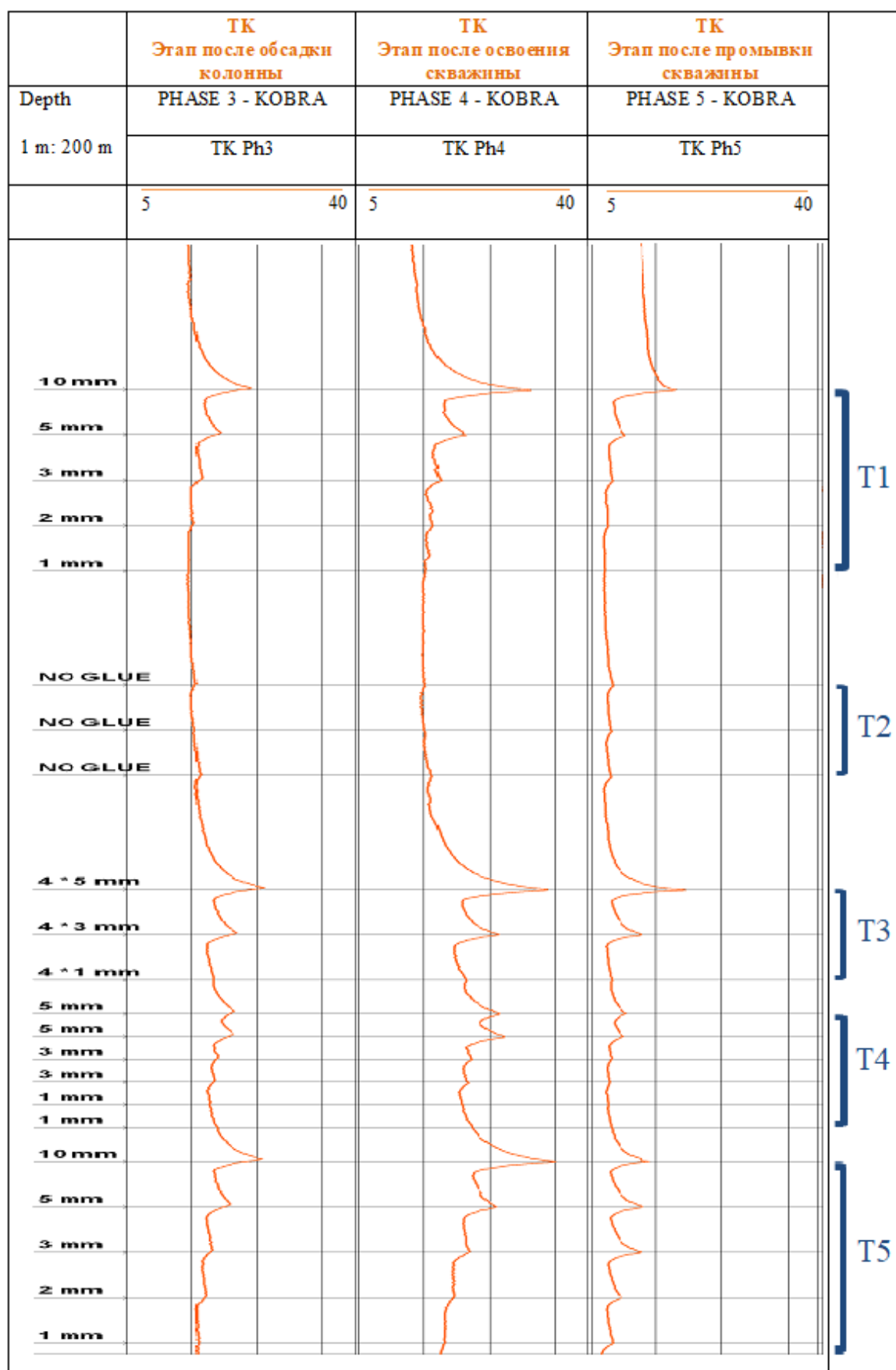


Рис. 4. Кривые каротажа ТК на разных этапах сооружения скважины

Fig. 4. Current logging curves at different stages of well construction

Заключение

В результате проведенных опытных работ в скважине были выявлены заметные преимущества метода КС в обсадке, такие как: детальная оценка качества соединения и герметичности обсадных колонн; повышенная вероятность определения дефектов обсадных колонн, вплоть до отверстий диаметром 1 мм; высокое разрешение по дифференциации диапазонов кривых каротажа, что позволяет более точно определить интервалы дефектов обсадных колонн.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Uranium Production by Country 2023. URL: <https://worldpopulationreview.com/country-rankings/uranium-production-by-country> (дата обращения: 15.06.2023).
2. Полезные ископаемые Казахстана: объяснительная записка к Карте полезных ископаемых Казахстана масштаба 1:1000 000 // под ред. И.И. Никитченко. – Кокшетау: Изд-во Инф.-аналит. центра геологии, 2002. – 188 с.
3. Uranium deposits of the World, Asia / Ed by F.J. Dahlkamp. – Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2009. – 494 p. URL: https://link.springer.com/referenceworkentry/10.1007/978-3-540-78558-3_6 (дата обращения: 15.06.2023).
4. Урановые месторождения Казахстана (экзогенные) / Н.Н. Петров, Б.Р. Берикболов, Х.Б. Аубакиров, А.Ф. Вершков, В.Ф. Лухтин, В.Н. Плеханов, В.М. Черняков, В.Г. Язиков. 2-е изд. – Алматы: Изд-во «Гылым», 2008. – 320 с.
5. Underground uranium borehole leaching / Ye.S. Oryngozhin, N.A. Yeremin, G.P. Metaxa, Zh.N. Alisheva // News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Series of Geology and Technical Sciences. – 2020. – V. 4. – № 442. – P. 62–69. URL: <https://doi.org/10.32014/2020.2518-170X.85> (дата обращения: 15.06.2023).
6. Reactive transport modeling during uranium in Situ Leaching (ISL): the effects of ore composition on mining recovery / M.B. Kurmanseiti, M.S. Tungatarova, A. Kaltayev, J.J. Royer // Minerals. – 2022. – V. 12. – P. 1–21. URL: <https://doi.org/10.3390/min12111340> (дата обращения: 15.06.2023).
7. Study of mining-geological characteristics of uranium deposits of Kazakhstan for development by underground well leaching / Ye.Ye. Oryngozha, A.Ye. Vorobiev, M. Zhalgalieva, I.Zh. Uteshev // News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Series of geology and technology sciences. – 2020. – V. 5. – № 443. – P. 156–164. URL: <https://doi.org/10.32014/2020.2518-170X.116> (дата обращения: 15.06.2023).
8. Самоочищение продуктивного горизонта на месте проведения двухскважинного опыта по выщелачиванию урана на Добровольном месторождении (Курганская область) / А.В. Сашенко, Г.И. Авдонин, Г.А. Тарханова, М.Д. Носков // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 333. – № 5. – С. 137–147. URL: <https://doi.org/10.18799/24131830/2022/5/3422> (дата обращения: 15.06.2023).
9. Сковородников И.Г. Геофизические исследования скважин. 4-е изд., переработ. и дополн. – Екатеринбург: Изд-во УГТУ, 2014. – 456 с. URL: <https://www.geokniga.org/books/19295> (дата обращения: 15.06.2023).
10. Ellis D.V., Singer J.M. Well logging for earth scientists. Reprinted with corrections. – The Netherlands: Springer, 2008. – 699 p. URL: <https://www.geokniga.org/bookfiles/geokniga-ellis-dv-singer-jm-well-logging-earth-scientists-2008.pdf> (дата обращения: 15.06.2023).
11. Chopra P., Papp É., Gibson D. Geophysical well logging. – Canberra: Department of Geology, Australian National University, 2005. – № 1. – P. 105–115. URL: https://www.researchgate.net/publication/228994892_Geophysical_well_logging#fullTextFileContent (дата обращения: 15.06.2023).
12. Бейсекеев Е.Ш., Язиков Е.Г. Моделирование движения жидкостей в процессе эксплуатации скважинного фонда на месторождениях урана, обрабатываемых методом ПСВ // Известия

Вследствие экранных эффектов чувствительность способа измерений по схеме КС значительно выше, чем по электрической цепи ТК, и поэтому является более предпочтительной при промысловой жидкости с высокой минерализацией и большой глубине скважин.

Таким образом, в дальнейших работах по контролю технического состояния скважин (определение герметичности полимерных обсадных колонн) рекомендуется использование метода КС в обсадке в целях увеличения эффективности и качества сооружения скважин.

- Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333. – № 8. – С. 73–84. URL: <https://doi.org/10.18799/24131830/2022/8/3637> (дата обращения: 15.06.2023).
13. Методика интерпретации данных ГИС в программном обеспечении GIK при подсчете запасов урана / Ш. Кисеева, Д. Раушанбек, Н.А. Асирбек, А. Шарапатов // Сатпаевские чтения – 2022. Тренды современных научных исследований: Труды международной научно-практической конференции. – Алматы: КазНУ, 2022. – Т. 1. – С. 33–39. URL: <https://official.satbayev.university.ru/materialy-satpaevskikh-cheniy> (дата обращения: 15.06.2023).
 14. Асирбек Н.А. Интерпретация данных КНД-м с одновременным ГК на урановых месторождениях гидрогенного типа // Актуальные проблемы урановой промышленности: сборник трудов X юбилейной Международной научно-практической конференции, посвященной 25-летию АО «НАК «Казатомпром» и 20-летию ТОО «Институт высоких технологий». – Алматы: КБТУ, 2022. – Т. 1. – С. 136–139. URL: <https://uranconference.kz> (дата обращения: 15.06.2023).
 15. Легавко А.В., Легавко Д.А. Новое программное обеспечение каротажа мгновенных нейтронов деления с аппаратно-методическим комплексом АМК КНД-М АИНК-49 // Геофизические исследования. – 2022. – Т. 23. – № 3. – С. 35–47. URL: <https://doi.org/10.21455/gr2022.3-3> (дата обращения: 15.06.2023).
 16. Mishunina A.S., Mekh A.A., Yazikov E.G. The effect of drilling waste on water resources – The elemental composition of waste // Key Engineering Materials – KEM. – 2017. – V. 743. – P. 338–341. URL: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.743.338> (дата обращения: 15.06.2023).
 17. Lavrov A. Flow of non-Newtonian fluids in single fractures and fracture networks: current status, challenges, and knowledge gaps // Engineering Geology. – 2023. – V. 321. – P. 1–17. URL: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2023.107166> (дата обращения: 15.06.2023).
 18. Study on the model and law for radial leakage of drilling fluid in fractured formations / Shubo Bi, Yan Zhang, Zhi Zhou, Yishan Lou, Rui Zhou, Ximin Zhang // ACS Omega. – 2022. – V. 7. – № 44. – P. 39840–39847. URL: <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c03895> (дата обращения: 15.06.2023).
 19. Sharapatov A., Shayakhmet M. Physico-geological basis of efficiency of application of aeromagnetic method in oil-gas Caspian lowland // News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Series of Geology and Technical Sciences. – 2017. – V. 3. – № 423. – P. 95–99. URL: <http://www.geolog-technical.kz/images/pdf/g20173/9599.pdf> (дата обращения: 15.06.2023).
 20. Sharapatov A., Taikulakov E.E., Assirbek N.A. Geophysical methods capabilities in prospect evaluation and detection of copper-bearing localizations of western Pre-Balkhash // News of the National academy of sciences of the Republic Kazakhstan. Series of geology and technical sciences. – 2020. – V. 3. – № 441. – P. 72–78. URL: <https://doi.org/10.32014/2020.2518-170X.56> (дата обращения: 15.06.2023).

Поступила: 19.07.2023 г.

Прошла рецензирование: 26.07.2023 г.

Информация об авторах

Шарапатов А., кандидат геолого-минералогических наук, ассоциированный профессор кафедры геофизики Казахского национального исследовательского технического университета имени К.И. Сатпаева.

Асирбек Н.А., докторант кафедры геофизики Казахского национального исследовательского технического университета имени К.И. Сатпаева.

Саманбетов Н.З., магистрант кафедры геофизики Казахского национального исследовательского технического университета имени К.И. Сатпаева.

UDC 553.495:550.832.7:622.245.01

EVALUATION OF THE EFFICIENCY OF ELECTRIC LOGGING METHODS WHEN STUDYING TIGHTNESS OF CASING STRINGS IN WELLS OF URANIUM DEPOSITS

Abish Sharapatov¹,
a.sharapatov@satbayev.university

Nazerke Assirbek¹,
n.assirbek@stud.satbayev.university

Nurlan Samanbetov¹,
n.samanbetov@stud.satbayev.university

¹ Satbayev University,
22, Satbayev street, Almaty, A15M8C4 (050013), Kazakhstan.

The relevance. When exploiting uranium deposits using the method of in-situ leaching, many problematic issues arise. Among them, it is possible to distinguish a violation of the integrity and tightness of the polymer casing, which leads to leakage of solutions due to defects and threaded connections, colmatation, etc. With the help of geophysical wells surveys, namely current logging and resistivity logging, there is a technological possibility of obtaining actual data on the leakage of solutions into the near-wellbore space (their location, size). The distribution of solutions in the annulus lead to technological and environmental violations during the development of deposits.

The main aim: comparative evaluation of the effectiveness of current logging and resistivity logging in solving technological problems – assessment of the integrity of polymer pipes and tightness of threaded connections in the casing of uranium wells and determination of the parameters of liquidation of wells with damaged columns based on the data of current logging or resistivity logging in the casing.

Objects: artificial defects in the casing for experimental work: holes in pipes with different diameters and locations, leaky connections of casing pipes.

Methods. The work was carried out at one of the sites of the Shu-Sarysu province uranium deposit and includes the following activities: preparation of polymer casing strings for the experiment; physical and technical justification of using geophysical wells surveys methods to study the problem; performing measurement work by current logging and resistivity logging methods; performing computational work using current logging, resistivity logging readings and obtaining values of a probabilistic parameter for evaluation of the state of the casing strings and the decision on the operation of wells; comparative analysis and drawing conclusions on the informativeness of borehole geophysical (electrical) methods.

Research results showed that the resistivity logging method is optimal to solve the problem of monitoring the technical condition of casing strings. The conclusions of the research are based on the analysis of the nature of changes in the diagrams of the electrical methods of current logging and resistivity logging, the sensitivity of the measured values of the electric field to defects in the casing. The quantitative values of the parameter % ANO – the amount of current leakage (anomalies), obtained by calculation according to current logging and resistivity logging data, are probabilistic in nature. They made it possible to develop recommendations for making technological and/or managerial decisions on the condition of casing strings and the further use of production wells with various defects in them.

Key words:

Uranium deposits, integrity and tightness of casing strings, polymer pipes, current logging, resistivity logging, optimal logging method.

REFERENCES

1. *Uranium Production by Country 2023*. Available at: <https://worldpopulationreview.com/country-rankings/uranium-production-by-country> (accessed 15 June 2023).
2. *Poleznye iskopayemye Kazakhstana: poyasnitelnaya zapiska k Karte poleznykh iskopayemykh Kazakhstana mashtaba 1:1000000* [Mineral resources of Kazakhstan. Explanatory note for the Map of the mineral resources of Kazakhstan, 1:1000 000 scale]. Ed. by I.I. Nikitchenko. Kokshetau, Information and Analytical Center of Geology Publ. House, 2002. 188 p.
3. *Uranium deposits of the World, Asia*. Ed. by F.J. Dahlkamp. Berlin Heidelberg, Springer-Verlag, 2009. 494 p. Available at: https://link.springer.com/referenceworkentry/10.1007/978-3-540-78558-3_6 (accessed 15 June 2023).
4. Petrov N.N., Berikbolov B.R., Aubakirov Kh.B., Vershkov A.F., Lukhtin V.F., Plekhanov V.N., Chernyakov V.M., Yazikov V.G. *Uranovye mestorozhdeniya Kazakhstana (ekzogennyye)* [Uranium deposits of Kazakhstan (exogenous)]. 2nd ed. Almaty, Gylm Publ. House, 2008. 320 p.
5. Oryngozhin Ye.S., Yeremin N.A., Metakha G.P., Alisheva Zh.N. Underground uranium borehole leaching. *News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Series of Geology and Technical Sciences*, vol. 4, no. 442 (2020), pp. 62–69. Available at: <https://doi.org/10.32014/2020.2518-170X.85> (accessed 15 June 2023).
6. Kurmanseit M.B., Tungatarova M.S., Kaltayev, A., Royer J.-J. Reactive transport modeling during uranium in Situ Leaching (ISL): the effects of ore composition on mining recovery. *Minerals*, 2022, no. 12 (11), pp. 1–21. Available at: <https://doi.org/10.3390/min12111340> (accessed 15 June 2023).
7. Oryngozha Ye.Ye., Vorobiev A.Ye., Zhangaliyeva M., Uteshev I.Zh. Study of mining-geological characteristics of uranium deposits of Kazakhstan for development by underground well leaching. *News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Series of geology and technology sciences*, 2020, vol. 5, no. 443, pp. 156–164. Available at: <https://doi.org/10.32014/2020.2518-170X.116> (accessed 15 June 2023).
8. Sashchenko A.V., Avdonin G.I., Tarkhanova G.A., Noskov M.D. Self-purification of the productive horizon at the site of the two-hole in situ leaching experiment at the Dobrovolnoe uranium deposit (Kurgan region). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, no. 5, pp. 137–147. In Rus. Available at: <https://doi.org/10.18799/24131830/2022/5/3422> (accessed 15 June 2023).
9. Skovorodnikov I.G. *Geofizicheskie issledovaniya skvazhin* [Geophysical surveys of wells]. 4th ed., revised and added. Yekaterinburg, Ural State Mining University Publ. House, 2014. 456 p. Available at: <https://www.geokniga.org/books/19295> (accessed 15 June 2023).
10. Ellis D.V., Singer J.M. *Well logging for earth scientists*. Reprinted with corrections. The Netherlands, Springer, 2008. 699 p.

- Available at: <https://www.geokniga.org/bookfiles/geokniga-ellis-dv-singer-jm-well-logging-earth-scientists-2008.pdf> (accessed 15 June 2023).
11. Chopra P., Papp É., Gibson D. *Geophysical well logging*. Canberra, Department of Geology, Australian National University, January 2005. pp. 105–115. Available at: https://www.researchgate.net/publication/228994892_Geophysical_well_logging#fullTextFileContent (accessed 15 June 2023).
 12. Beisekeyev Y.Sh., Yazikov E.G. Simulation of liquid movement while well fund operation in uranium deposits produced by ISL method. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, no. 8, pp. 73–84. In Rus. Available at: <https://doi.org/10.18799/24131830/2022/8/3637> (accessed 15 June 2023).
 13. Kiseyeva Sh., Raushanbek D., Assirbek N.A., Sharapatov A. Metodika obrabotki dannykh GIS v programnom analize GIK pri podschete zapasov urana [The method of interpretation of GWL data in GIK software when calculating uranium reserves]. *Saptaevskie chteniya – 2022. Trendy sovremennykh nauchnykh issledovaniy. Trudy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Proceedings of the international scientific and practical conference. Satbayev conference – 2022. Trends in modern scientific research]. Almaty, Satbayev University, 12 April 2022. Vol. I, pp. 33–39. Available at: <https://official.satbayev.university/ru/materialy-saptaevskikh-cheniy> (accessed 15 June 2023).
 14. Assirbek N.A. Interpretatsiya dannykh KND-m s odnovremennym ispolzovaniyem GK po uranovym mestorozhdeniyam gidrogeonnogo tipa [Interpretation of data of Neutron Fission Logging with simultaneous gamma ray logging in hydrogen type uranium deposits]. *Aktualnye problemy uranovoy promyshlennosti. Sbornik trudov X yubileyroy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyashchennoy 25-letiyu AO «NAK «Kazatoprom» i 20-letiyu TOO «Institut vysokikh tekhnologiy»* [Actual problems of the uranium industry: a collection of proceedings of the X anniversary International Scientific and Practical Conference dedicated to the 25th anniversary of NAC Kazatoprom and the 20th anniversary of the Institute of High Technologies LLP]. P. 1. Almaty, KBTU, November 24–26, 2022. pp. 136–139. Available at: <https://uranconference.kz> (accessed 15 June 2023).
 15. Legavko A.V., Legavko D.A. Novoe programnoe obespechenie karotazha budushchikh neytronov deleniya s apparaturno-metodicheskimi kompleksami AMK KND-M AINK-49 [New software for prompt fission neutron logging with hardware-methodical complex AMC KND-M AINK-49]. *Geophysical research*, 2022, vol. 23, no. 3, pp. 35–47. In Rus. Available at: <https://doi.org/10.21455/gr2022.3-3> (accessed 15 June 2023).
 16. Mishunina A.S., Mekh A.A., Yazikov E.G. The effect of drilling waste on water resources - The elemental composition of waste. *Key Engineering Materials KEM*, 2017, vol. 743. pp. 338–341. Available at: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.743.338> (accessed 15 June 2023).
 17. Lavrov A. Flow of non-Newtonian fluids in single fractures and fracture networks: current status, challenges, and knowledge gaps. *Engineering Geology*, 2023, vol. 321, pp. 1–17. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2023.107166> (accessed 15 June 2023).
 18. Shubo Bi, Yan Zhang, Zhi Zhou, Yishan Lou, Rui Zhou, Ximin Zhang. Study on the model and law for radial leakage of drilling fluid in fractured formations. *ACS Omega*, 2022, vol. 7, no. 44, pp. 39840–39847. Available at: <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c03895> (accessed 15 June 2023).
 19. Sharapatov A., Shayakhmet M. Fiziko-geologicheskie osnovy effektivnosti primeneniya aeromagnitnogo metoda v neftegazonnoy Prikaspiyskoy nizmennosti [Physico-geological basis of efficiency of application of aeromagnetic method in oil-gas caspian lowland]. *News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, series of geology and technical sciences*, 2017, vol. 3, no. 423, pp. 95–99. In Rus. Available at: <http://www.geolog-technical.kz/images/pdf/g20173/9599.pdf> (accessed 15 June 2023).
 20. Sharapatov A., Taikulakov E.E., Assirbek N.A. Geophysical methods capabilities in prospect evaluation and detection of copper-bearing localizations of western Pre-Balkhash. *News of the National academy of sciences of the Republic Kazakhstan, series of geology and technical sciences*, 2020, vol. 3, no. 441. pp. 72–78. Available at: <https://doi.org/10.32014/2020.2518-170X.56> (accessed 15 June 2023).

Received: 19 July 2023.

Reviewed: 26 July 2023.

Information about the authors

Abish Sharapatov, Cand. Sc., associate professor, Satbayev University.

Nazerke Assirbek, doctoral student, Satbayev University.

Nurlan Samanbetov, undergraduate, Satbayev University.

УДК 550.47

ГЕОХИМИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ИСТОЧНИКА МЕЖМЕРЗЛОТНЫХ ВОД СУЛЛАР: ВТОРИЧНОЕ МИНЕРАЛООБРАЗОВАНИЕ И ПОТОКИ МЕТАНА

Солдатова Евгения Александровна^{1,2},
2a61@mail.ru

Сидкина Евгения Сергеевна²,
SidkinaES@yandex.ru

Кирюхин Богдан Александрович¹,
bogdan.kirukhin67@gmail.com

Максимов Прокопий Николаевич³,
pnm1@tpu.ru, yakutprosh@gmail.com

Кривенок Людмила Алексеевна⁴,
krivenok@ifaran.ru

Иванов Владимир¹,
v.ivanov@utmn.ru

Тананаев Никита Иванович^{5,6},
tanni@s-vfu.ru

¹ Тюменский государственный университет,
Россия, 625003, г. Тюмень, ул. Володарского, 6.

² Геологический институт РАН,
Россия, 119017, г. Москва, Пыжевский пер, 7, стр. 1.

³ Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 635050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

⁴ Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН,
Россия, 119017, г. Москва, Пыжевский пер., 3.

⁵ Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН,
Россия, 670010, г. Якутск, ул. Мерзлотная, 36.

⁶ Северо-Восточный федеральный университет,
Россия, 670013, г. Якутск, ул. Кулаковского, 46.

Актуальность и объект исследования. Межмерзлотные водоносные горизонты и области их разгрузки с приуроченными к ним сезонными наледями подземных вод – особые мерзлотно-гидрогеологические и гидрохимические системы, нетипичные для мощной сплошной криолитозоны центральной Якутии. Различия в содержании хлорфторуглеродов указывают на анаэробный статус некоторых источников, предполагающий микробную деградацию этих соединений метаногенными бактериями. В области разгрузки таких источников происходит резкая смена геохимической обстановки, приводящая к трансформации химического состава вод и запускающая процессы вторичного минералообразования в этой буферной области. В данной работе рассмотрена геохимическая система источника Суллар – самого северного и наименее изученного в группе источников межмерзлотных вод правобережья р. Лены. В ходе экспедиционных исследований в зоне разгрузки источника нами была обнаружена интенсивная аккумуляция аутигенных минералов, в первую очередь соединений железа, а также формирующиеся на них бактериальные маты в виде опалесцирующей пленки. Ряд исследователей связывает трансформацию соединений железа при оттаивании многолетнемерзлых пород с процессами миграции и преобразования органического вещества, в том числе его микробного потребления с выделением метана. Мы предположили наличие взаимосвязи между особенностями вторичного минералообразования и содержанием и эмиссией метана в зоне разгрузки источника. Представленная работа – первое комплексное описание гидрохимии источника межмерзлотных вод Суллар.

Целью работы было выявить влияние геохимических условий и микробных сообществ на формирование вторичных минералов и потоков метана с поверхности источника, в частности, оценить влияние смены геохимической обстановки при разгрузке межмерзлотных вод на осаждение Fe и проанализировать связь между этим процессом и потоками метана. Для этого были изучены химический состав воды источника Суллар, потоки парниковых газов с его поверхности, а также минеральный и микробиологический состав корок вторичных минералов и элювия, отобранных в долине источника в непосредственной близости от точек отбора проб воды.

Методы. Содержание основных ионов определялось методом ионной хроматографии. Концентрация гидрокарбонат иона и растворенной углекислоты рассчитаны методом равновесного моделирования исходя из значений pH и Eh системы. Содержание микрокомпонентов определялось методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой. Для выявления сезонной и годовой изменчивости был проведен ретроспективный анализ данных о химическом составе воды источника Суллар за период с 1962 по 2020 гг. Удельные потоки были измерены при помощи камерного метода. Концентрация метана определялась методом газовой хроматографии с пламенно-ионизационным детектором. Текстурно-структурные особенности корок вторичных минералов и элювия определены с помощью петрографического микроскопа. Химический состав отдельных минеральных фаз оценивался с помощью сканирующего электронного микроскопа, оснащенного детектором для энергодисперсионного рентгеноспектрального микроанализа. Концентрацию ДНК измеряли на флуориметре. Библиотеки ампликонов создавали с помощью полимерной цепной реакции с универсальными праймерами для области V4. Равновесное моделирование проведено в программе HCh. За исходные данные приняты аналитические данные о химическом составе изучаемых проб воды.

Результаты и выводы. Основным минералом, образующимся из природных вод источника Суллар является гетит. Его образование является преобладающим механизмом вывoda Fe из раствора. Окислительный (кислородный) барьер имитирован в

модели изменением окислительно-восстановительных условий. Модельные результаты согласуются с натурными наблюдениями: уменьшением содержания Fe практически сразу после разгрузки межмерзлотных вод и формированием красно-бурых корок вторичных минералов в долине источника. Наличие корок окислов железа на терригенном материале и преобладание (гидро)окислов железа в минеральном составе осадка, выпавшего из пробы воды источника Суллар в лабораторных условиях, фиксируется по данным СЭМ. Был сделан вывод, что удаление из раствора основной массы Fe связано с образованием (гидро)окислов при его переходе из хорошо растворимой восстановленной формы в менее растворимую, окисленную на кислородном барьере. Механизмом образования железо-карбонатных пленок, обнаруженных на терригенном материале, является испарительное концентрирование в сочетании с увеличением pH при взаимодействии разгружающихся межмерзлотных вод с атмосферой. Железо связывается карбонатными пленками за счет функционирования сорбционного карбонатного барьера: в связи с малым значением произведения растворимости многих карбонатов двухвалентных элементов эти элементы еще до образования своих карбонатов соосаждаются с карбонатом кальция. Помимо Fe, на сорбционном карбонатном барьере осаждаются и небольшое количество Mn. Высокая относительная распространенность метанотрофов и низкое количество метаногенов в элювии, отобранном со дна источника Суллар, указывают на то, что метан поступает из межмерзлотного водоносного горизонта и начинает окисляться бактериальными сообществами в приповерхностных условиях, однако значительная часть метана расходуется на эмиссию. Железевосстанавливающие бактерии обнаружены на уже сформировавшихся корках вторичных минералов на высохших участках русла и почти отсутствуют в донном элювии, что исключает их влияние на метаногенез.

Ключевые слова:

Подземные воды, геохимия углерода, геохимия железа, парниковые газы, аутигенные минералы, микробные сообщества, Центральная Якутия.

Введение

Межмерзлотные водоносные горизонты и области их разгрузки с приуроченными к ним сезонными наледями подземных вод – особые мерзлотно-гидрогеологические и гидрохимические системы, нетипичные для мощной сплошной криолитозоны центральной Якутии. Первые описания выходов подмерзлотных вод в долинах правобережья р. Лены южнее Якутска относятся к середине 1920-х гг., а с начала 1950-х гг. эти постоянно действующие источники и питающие их водоносные горизонты начали изучаться систематически [1]. Доля межмерзлотного питания этих источников различна: у одних она превышает 90 %, у других может снижаться до 50 % в полноводные годы с обильными атмосферными осадками [2]. Период водообмена водоносных горизонтов оценивается в 40–55 лет и более по данным тритиевой съёмки [3]. Различия в содержании хлорфторуглеродов указывают на анаэробный статус некоторых источников, предполагающий микробную деградацию этих соединений метаногенными бактериями [3]. В области разгрузки таких источников происходит резкая смена геохимической обстановки, приводящая к трансформации химического состава вод и запускающая процессы вторичного минералообразования в этой буферной зоне.

Изучение вторичного минералообразования на геохимических барьерах позволяет детально описать фундаментальные механизмы, определяющие формирование геохимического фона [4], состава природных вод, а также решить практическую задачу – оценить влияния сельскохозяйственного и горно-добывающего производств на окружающую среду [5–7].

В данной работе рассмотрена геохимическая система источника Суллар – самого северного и наименее изученного в группе источников межмерзлотных вод правобережья р. Лены. В ходе экспедиционных исследований в зоне разгрузки источника нами была обнаружена интенсивная аккумуляция аутигенных минералов, в первую очередь соединений железа, а

также формирующиеся на них бактериальные маты в виде опалесцирующей пленки. Очевидно, что смена геохимической обстановки запускает здесь и процессы преобразования химического состава вод, и формирование вторичных минералов. Ряд исследователей связывает трансформацию соединений железа при оттаивании многолетнемерзлых пород с процессами миграции и преобразования органического вещества, в том числе его микробного потребления с выделением метана [8, 9]. Поскольку признаки анаэробии и метаногенеза, а также наличие растворенного метана ранее были описаны в аналогичных условиях [3], мы предположили наличие взаимосвязи между особенностями вторичного минералообразования и содержанием и эмиссией метана в зоне разгрузки источника. Наша работа – первое комплексное описание гидрохимии источника межмерзлотных вод Суллар.

Район исследований

Источник Суллар расположен на правобережье р. Лены, в 32 км к северо-северо-востоку от г. Якутска, в Мегино-Кангаласском улусе (районе) Республики Саха (Якутия) (рис. 1, а). Район исследований расположен в сплошной криолитозоне, мощность которой составляет от 200 до 400 м [10]. Согласно почвенно-географическому районированию Якутии, район относится к среднетаежной подзоне умеренно холодного (бореального) пояса Восточно-Сибирской мерзлотно-таежной области. Источник и долина, в которой он разгружается, относятся к памятникам природы, имеющим региональное значение.

Долина источника Суллар вложена в III надпойменную (Бестяхскую) террасу р. Лены [11] на глубину порядка 30 м. Нижняя часть долины открывается в современную высокую пойму р. Лены, которая на этом участке перекрыта конусом выноса ручья Суллар, аккумулятирующим выносимый из долины материал. Бестяхская терраса сложена однородными по разрезу тонко- и среднезернистыми желтоватыми песками [12], возраст террасы в настоящее время дискуSSIONный, однако современные исследователи схо-

дятся на быстром накоплении её основного объёма в середине и финале последнего ледникового максиму-

ма и последующей переработке золовыми и термокарстовыми процессами [13–15].

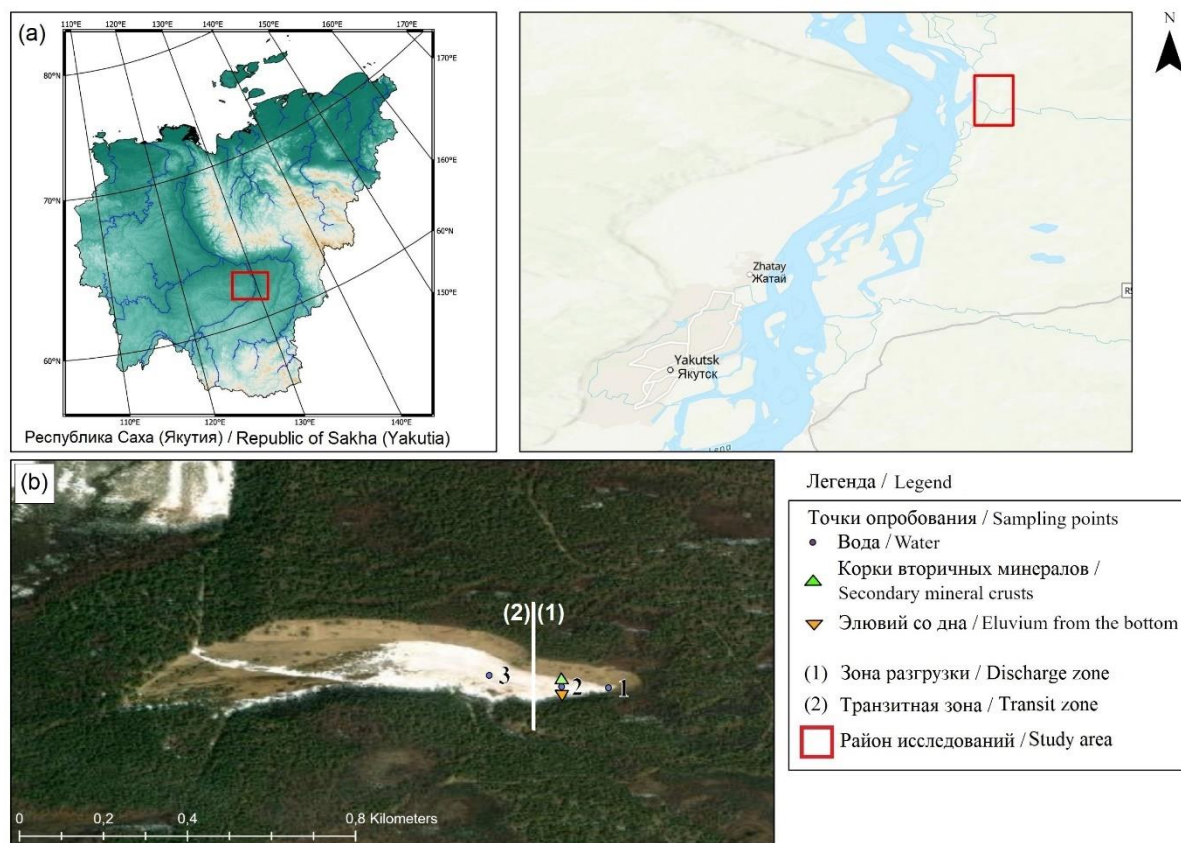


Рис. 1. Схема расположения района исследований (а) и долины источника Суллар с точками опробования (б)

Fig. 1. Scheme of location of the study area (a) and the Sullar spring with sampling points (b)

Бестяхская терраса – область распространения уникальных межмерзлотных таликов, нетипичных для остальной территории центральной Якутии, и приуроченных к ним водоносных горизонтов [1, 16, 17]. Подземные воды этих горизонтов разгружаются вдоль тылового шва долины р. Лены, образуя постоянно действующие выходы напорных вод, хорошо выработанные долины и крупные наледы, из которых наиболее известные и изученные – источники Булуус, Улахан-Тарын, Ерюю. К таким выходам относится и источник в долине Суллар, где также ежегодно образуются сезонные наледы подземных вод. В пределах долины выделяются две зоны (рис. 1, б): (1) привершинная, или собственно зона разгрузки межмерзлотных вод, длиной около 100 м и шириной в нижней части порядка 60–65 м; (2) транзитная, протяженностью около 300 м и шириной от 120 м в верхней части до 170 м в примыкании к пойме р. Лены.

Суммарный дебит источника Суллар в летний период составляет порядка 10 л/с и складывается, как правило, из дебита нескольких очагов разгрузки, приуроченных к вершине долины Суллар и примыкающему к ней участку правого борта долины. Выходы подземных вод представлены грифонами в котлах диаметром в первые дециметры, а также сериями небольших грифонов диаметром не больше первых сантиметров, распределенных на площади от 0,5 до 1,5 м². Вторичные минеральные образования оса-

ждаются из воды источника и в зоне разгрузки, и в транзитной зоне, частично покрывают дно водотока и растительные остатки в тех местах, где скорость течения замедляется. Также корки вторичных минералов наблюдаются на участках пересохшего русла, то есть потенциально они отлагались под телом наледи.

Материалы и методы

Опробование

Опробование природных вод и донных отложений источника Суллар проводилось в июле 2021 г. В результате было отобрано три пробы воды для определения общего химического состава и содержания микрокомпонентов и две пробы осадочных отложений, представляющие собой корки вторичных минералов, формирующиеся рядом с источником, и элювиальный материал со дна источника для определения микробиологического и минерального состава.

На точке опробования определялись быстроменяющиеся физико-химические показатели, характеризующие воду, – температура, pH, Eh, УЭП (мультиметр WTW 3620 с pH-электродом Sentix 940 и датчиком проводимости TetraCon 925, Германия), содержание растворенного кислорода (AZ8401 DO Meter, AZ Instruments, КНР). Пробы воды фильтровали через стерильные нейлоновые фильтры с размером пор 0,22 мкм в пробирки типа Фалькон.

Отбор корок вторичных минералов для минерального и микробиологического анализа (S1) производился из хемогенно-осадочного чехла рядом с водотоком в непосредственной близости от места отбора пробы воды 2 (рис. 1). Отобранный образец содержал значительное количество элювиального материала, представленного мелкообломочными рыхлыми отложениями (песком) серого и желтовато-серого цвета. Для микробиологического анализа также был отобран элювиальный материал со дна источника Суллар (S2). Отбор проб вторичных минералов и элювия производился в стерильные зип-пакеты. Пробы, отобранные на микробиологический анализ, сразу после отбора были заморожены при температуре -7°C .

Химический анализ воды

Содержание основных элементов определялось в лаборатории функциональной экологии и окружающей среды (Laboratoire Ecologie Fonctionnelle et Environnement – LEFE) Университета Тулузы, Франция, методом ионной хроматографии (Dionex ICS-1100, Thermo Fischer Sci., США). Концентрации гидрокарбонат-иона и растворенной углекислоты были рассчитаны методом равновесного моделирования исходя из значений pH и Eh системы. Содержание микрокомпонентов определялось в лаборатории наук о Земле и окружающей среде (Géosciences et

Environnement Toulouse – GET) Обсерватории Юг-Пиренеи, Франция, методом трехквadrупольной масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (iCAP TQ, Thermo Fischer Sci., США). Кроме того, был сделан ретроспективный анализ химического состава воды источника Суллар за период с 1962 по 2020 гг., по данным, собранным сотрудниками Института мерзлотоведения имени П.И. Мельникова СО РАН (г. Якутск).

Анализ донных отложений и аутигенных минералов

Для определения качественного минерального состава образцы корок вторичных минералов и элювиального материала позднелицен-эоплейстоценовых осадков Бестяхской террасы (рис. 2, а–с) были высушены до воздушно-сухого состояния.

Кроме того, чтобы подтвердить возможность осаждения вторичных минералов из водного раствора и выявить доминирующие формы осаждения, был проанализирован осадок, высадившийся из пробы воды источника Суллар в течение двух месяцев после отбора непосредственно в пробирке (рис. 2, d). Осадок, выпавший в пробирке, представлял собой аморфный материал, дифференцированный по слоям, в соответствии с которыми он был разделен на образцы, которые были высушены до воздушно-сухого состояния.



Рис. 2. Фото корок вторичных минералов в долине источника Суллар (а–с) и гидрогенных минералов, высадившихся из отобранной пробы воды источника Суллар в лабораторных условиях (d) с разделением по визуально выделенным слоям: Слой 1 – верхний, светло-желтый (осаждался последним); Слой 2 – средний, красновато-бурый; Слой 3 – ядро, светло-бурый (не показан на рисунке); Слой 4 – нижний, темно-бордовый (осаждался первым)

Fig. 2. Photo of secondary mineral crusts in the Sullar spring valley (a–c) and authigenic minerals precipitated from Sullar water under laboratory conditions (d) with visual separation by the layers: Layer 1 – upper, light yellow (precipitated last); Layer 2 – medium, reddish-brown; Layer 3 – core, light brown (not shown in the Figure); Layer 4 – lower, maroon (deposited first)

Определение минералогических особенностей проводилось комплексом макро-микроструктурных исследований с сопровождением химического анали-

за хемогенного и терригенного материала. Характеристика текстурно-структурных особенностей проводилась с помощью петрографического микроскопа.

Химический состав отдельных минеральных фаз оценивался с помощью сканирующего электронного микроскопа Vega 3 SBU (TESCAN, Чехия), оснащенного детектором для энергодисперсионного рентгеноспектрального микроанализа X-Max 50 (OXFORD Instruments, Великобритания) в Томском политехническом университете.

Измерения удельных потоков метана и его растворенной концентрации

Удельные потоки (УП) метана и углекислого газа были измерены при помощи камерного метода с использованием двух плавающих пластиковых покрытых светоотражающей пленкой камер с закрепленными на них поплавками, обеспечивающими погруже-

ние камеры в воду на глубину нескольких сантиметров. Надводный объем камер 9,12 и 9,24 л, площадь основания 0,08 м². Камеры устанавливались рядом друг с другом (рис. 3), одна – над зоной разгрузки крупного грифона, другая – над зоной разгрузки грифона, имеющего, по визуальной оценке, меньший дебит. Экспозиция одного измерения составляла 16–22 мин, с каждой камеры УП измерялся в трехкратной повторности. Одновременно замерялась температура воды при помощи температурного регистратора iButton DS1925L-F5 (Maxim Integrated, США), воздуха, скорость ветра и атмосферное давление вблизи поверхности воды с помощью портативной метеостанции Kestrel 5000 (Kestrel Instruments, США).



Рис. 3. Плавающие камеры над грифонами на источнике Суллар

Fig. 3. Floating chambers in the Sullar spring

Газовая фаза после отбора через шприц закачивалась в предварительно заполненные солевым раствором герметичные стеклянные флаконы [18]. Во время камерных измерений были отобраны пробы воды для определения концентрации растворенного метана (у дна в непосредственной близости от каждого грифона, у поверхности вблизи расположения камер и в 10 м от них). Отбор производился методом паровфазной экстракции: каждый образец воды объемом 40 мл отбирался в пластиковый шприц и после добавления 20 мл атмосферного воздуха энергично встряхивался в течение трех минут для экстракции растворенного в воде метана [19]. Экстрагированный метан также закачивался в герметичные стеклянные флаконы, заполненные солевым раствором.

Концентрация метана определялась методом газовой хроматографии на хроматографе Кристалл 5000.2 с пламенно-ионизационным детектором (ЗАО СКБ «Хроматэк», Россия) в Лаборатории математической экологии Института физики атмосферы (г. Москва) с азотом 99,9999 % чистоты в качестве газа-носителя.

УП и концентрации метана рассчитывались по методике [18].

Микробиологический анализ донных отложений

ДНК из образцов выделяли с помощью набора Fast DNA Spin Kit for Soil согласно методике производителя (MP Biomedicals, США). Концентрацию из-

меряли на флуориметре Qubit 2.0 с набором реагентов dsDNA Sreagent KIT (InvitrogenTM, США). Библиотеки ампликонов создавали в Институте микробиологии им. С.Н. Виноградского РАН (г. Москва, Россия) с помощью полимерной цепной реакции (метод ПЦР) с универсальными праймерами для области V4 в соответствии с ранее описанной методикой [20]. Праймеры были выбраны для наиболее объективного соотношения доменов бактерий и архей: 515F (5'-GTGBCAGCMGCCGCGGTAA-3') [21] и Pro-mod-805R (5'-GACTACNVGGGTMTCTAATCC-3') [22]. Секвенирование проводили на системе MiSeq (Illumina, США) в ООО «Биоспарк» (г. Троицк, Россия) с использованием реакции Miseq Reagent Micro KITv2, считывающей 150 нуклеотидов с каждого конца. Всего было получено 34670 последовательностей.

Демультиплексирование, а также последующую обработку и анализ последовательностей проводили с использованием соответствующих алгоритмов в программе QIIME 2 ver 2019.1 [23]. Оперативные таксономические единицы (ОТЕ) идентифицировали с помощью программ SILVAngs 1.4 pipeline и BLAST [24, 25].

Равновесное моделирование

Равновесное моделирование было проведено в программе HCh [26]. Модель включала в себя независимые компоненты: H, O, Ca, Mg, Na, K, C, S, Cl, Fe, Al, Si, Mn. При настройке модели были включены

ионы и водорастворенные комплексные частицы, состоящие из вышеперечисленных химических элементов. Также в модель был включен представительный перечень минералов, которые потенциально могут выпадать из природных вод в рассматриваемых условиях. За исходные данные приняты аналитические данные о химическом составе трех изучаемых проб воды. Равновесные составы этих проб были рассчитаны при Eh-pH условиях и температурах, измеренных в полевых условиях.

Согласно полевым данным, а также общим представлениям, с удалением от выхода на поверхность величина pH и температура воды увеличивается, а Eh, наоборот, снижается. В нашей модели мы несколько экстраполировали эти показатели для того, чтобы продемонстрировать их влияние на вторичное минералообразование и тренды изменения химического состава воды источника.

Результаты

Химический состав воды источника Суллар

Воды источника, отобранные в 2021 г., ультрапресные, среднее значение удельной электропроводности (УЭП) составляет 347 мкСм/см (таблица). По химическому типу вода относится к гидрокарбонатному магниево-кальциево-натриевому типу с практически эквивалентным содержанием магния и кальция, порядка 35 мг-экв/%, содержание натрия несколько ниже и составляет 25–28 мг-экв/%. Содержание растворенного органического углерода растет с удалением от зоны разгрузки.

Значения pH и температуры увеличиваются по мере удаления от зоны разгрузки (рис. 4). Таким же образом изменяется и содержание кислорода: в зоне

разгрузки концентрация растворенного кислорода (dissolved oxygen (DO)) составляет 1,89 мг/л, в нижнем течении – 10,04 мг/л (насыщение 94 %). Содержание растворенной углекислоты и Fe, наоборот, уменьшается с удалением от зоны разгрузки. Концентрация Mn также уменьшается вниз по потоку, но позже, чем концентрация Fe.

Таблица. Химический состав источника Суллар в августе 2021 г.

Table. Chemical composition of the Sullar spring in August 2021

Параметр/Parameter	Единица измерения Unit	Точка опробования Sampling point		
		1	2	3
Расстояние от зоны разгрузки Distance from the discharge area	м/м	0	20	120
Электропроводность/EC	μS/cm	323	362	355
pH	–	7,63	7,78	7,83
Eh	мВ/mV	209	202	190
Температура/Temperature	°C	1,0	1,2	12,2
O ₂	мг/л mg/L	1,89	4,69	10,04
POY/DOC		4,67	5,28	6,21
CO ₂		8,52	7,15	5,36
HCO ₃ [–]		224	238	238
Cl [–]		1,41	1,55	1,70
SO ₄ ^{2–}		<1,5	<1,5	<1,5
NO ₂ [–]		<0,02	<0,02	<0,02
NO ₃ [–]		<0,02	<0,02	0,02
NH ₄ ⁺		0,51	0,47	0,56
Na ⁺		21,3	24,3	25,1
K ⁺		1,98	2,05	2,12
Mg ²⁺		16,9	17,4	17,0
Ca ²⁺		26,9	28,0	27,8

Примечание: POY – растворенный органический углерод.
Notes: EC – electrical conductivity; DOC – dissolved organic carbon.

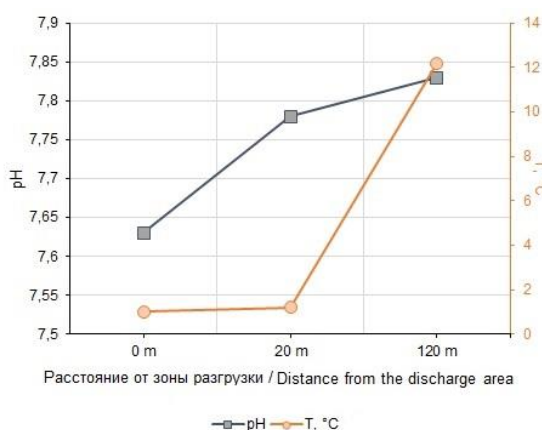
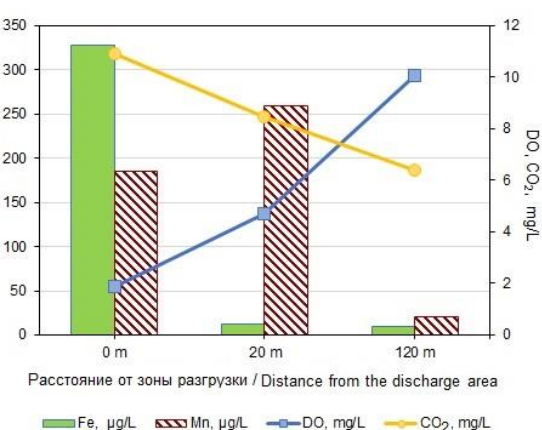


Рис. 4. Изменение физико-химических показателей состава воды по мере удаления от зоны разгрузки. T – температура воды; DO – концентрация растворенного кислорода.

Fig. 4. Changes of physico-chemical parameters of the water chemical composition with the increase of distance from the discharge area. T – temperature; DO – dissolved oxygen content.

Ретроспективный анализ химического состава показал отсутствие существенных изменений в химическом составе источника за период наблюдений (рис. 5), что характерно для всех исследованных источников межмерзлотных вод, независимо от вклада атмосферного питания [2, 17]. Кислотно-щелочной



показатель изменялся в интервале от 6,76 до 8,58. Минерализация варьировала 126 до 222 мг/л, показатель электропроводности изменялся от 250 до 370 μS/cm. Преобладающим анионом всегда являлся гидрокарбонат. В 1960-х гг. наблюдались повышенные концентрации хлорид-иона, однако это может быть свя-

зано с аналитической ошибкой или низкой точностью аналитических методов. Также несколько повышенные концентрации хлорид и сульфат ионов наблюдались в 1973, 2004, 2008 и 2020 гг., однако их относительные содержания оставались на уровне первых процентов от суммы анионов. Катионный состав на

протяжении периода наблюдений остается смешанным, в основном преобладающими являлись магний и кальций, реже, в основном в межсезонье, натрий. Концентрация Fe обычно отмечалась на уровне десятых мг/л.

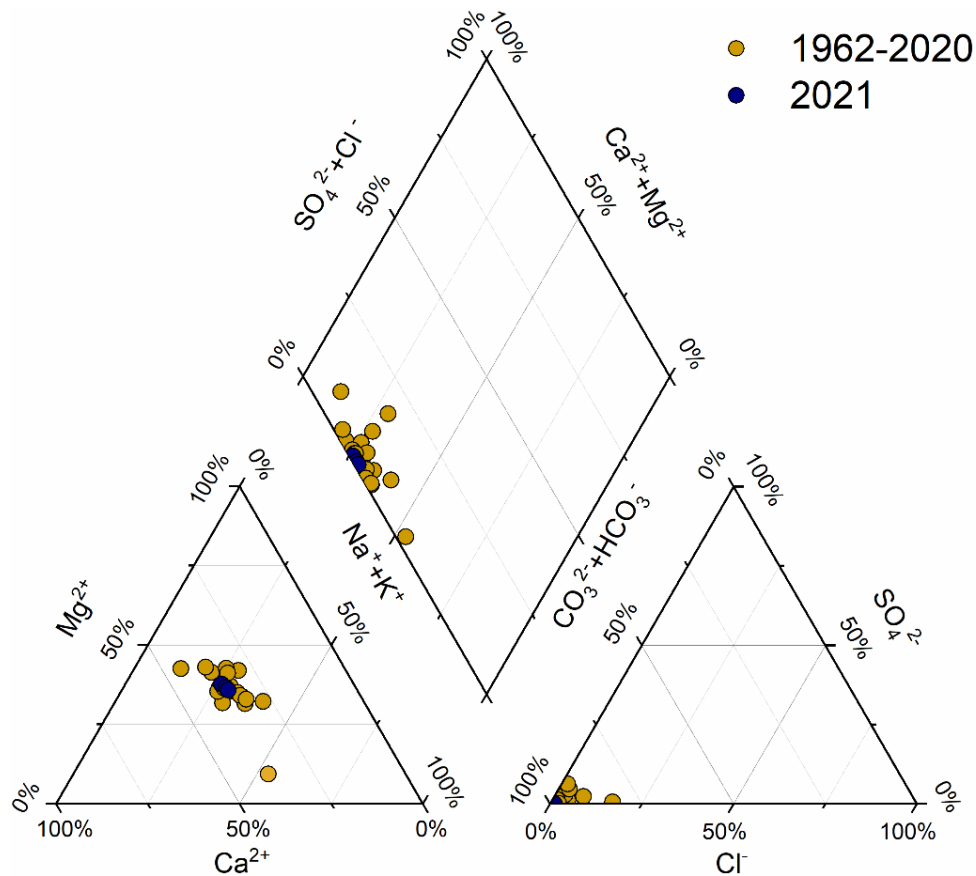


Рис. 5. Диаграмма Пайпера с нанесением данных по химическому составу источника Суллар за период с 1962 по 2021 гг.

Fig. 5. Piper diagram with the data on the chemical composition of the Sullar spring for 1962–2021

Проба воды, из которой происходило осаждение гидрогенных минералов, характеризовалась следующими параметрами: pH 7,78, T 1,2 °C, УЭП 362 мкСм/см, DO 4,69 мг/л (насыщение 36 %).

Содержание редкоземельных элементов (РЗЭ) в трёх точках пробоотбора вод источника (1, 2, 3, сверху вниз по течению), водах озера в области питания источника и остатках наледи, сохранившейся в тени левого борта долины Суллар, указывает на общность происхождения данных вод (рис. 6). Исследованные воды обеднены легкими РЗЭ, с $(La/Sm)_{UCC}$ между 0,5 и 0,7, $(La/Er)_{UCC}$ между 0,1 и 0,4. Во всех образцах проявляется иттриевая аномалия, определяемая по гольмию как $(Y/No)_{UCC}$ (рис. 6), происхождение которой предполагается геогенным; иттрий в меньшей степени подвержен аккумуляции на минеральных частицах и более мобилен. Ещё одна характерная общая черта спектра РЗЭ – положительная аномалия Eu, выраженная в большей степени в водах источника ($Eu/Eu^*=14...38$), в меньшей степени – в наледи ($Eu/Eu^*=6,8$) и озерных водах ($Eu/Eu^*=1,5$). В под-

земных водах криолитозоны положительные европиевые аномалии ранее не были установлены, их происхождение мы считаем унаследованным от выветривания полевых шпатов [27], которые должны быть обильно представлены в песчаных отложениях бессточной террасы, а также с выраженными восстановительными условиями в толще водоносного горизонта.

В поверхностных водах озера отмечаем отрицательную цериевую аномалию ($Ce/Ce^*=0,51$), наличие которой, напротив, говорит об окислительных условиях. Питание озера, по всей видимости, смешанное, поскольку в спектре РЗЭ наблюдаются признаки участия и межмерзлотного стока (положительная аномалия Eu, Y), и надмерзлотного (отрицательная аномалия Ce). Последняя, однако, может указывать на каталитическое окисление Ce(III) до Ce(IV) на частицах взвеси, покрытых корками Fe, Mn-(окси)гидроксидов [29], тогда нет противоречий в характеристике окислительно-восстановительной обстановки и вклад надмерзлотного питания незначителен. Косвенно по-

следнее подтверждается высокими значениями отношения U/Th , которое для всех образцов находится в пределах от 22 до 67, что скорее соответствует подземным водам. Предполагаем, что механизм каталитического окисления Se отвечает также за возникно-

вание слабых отрицательных цериевых аномалий в образцах ручья Суллар, отобранных непосредственно ниже зоны разгрузки, поскольку оно следует за резким снижением содержания в воде Fe и Mn и активным минералообразованием.

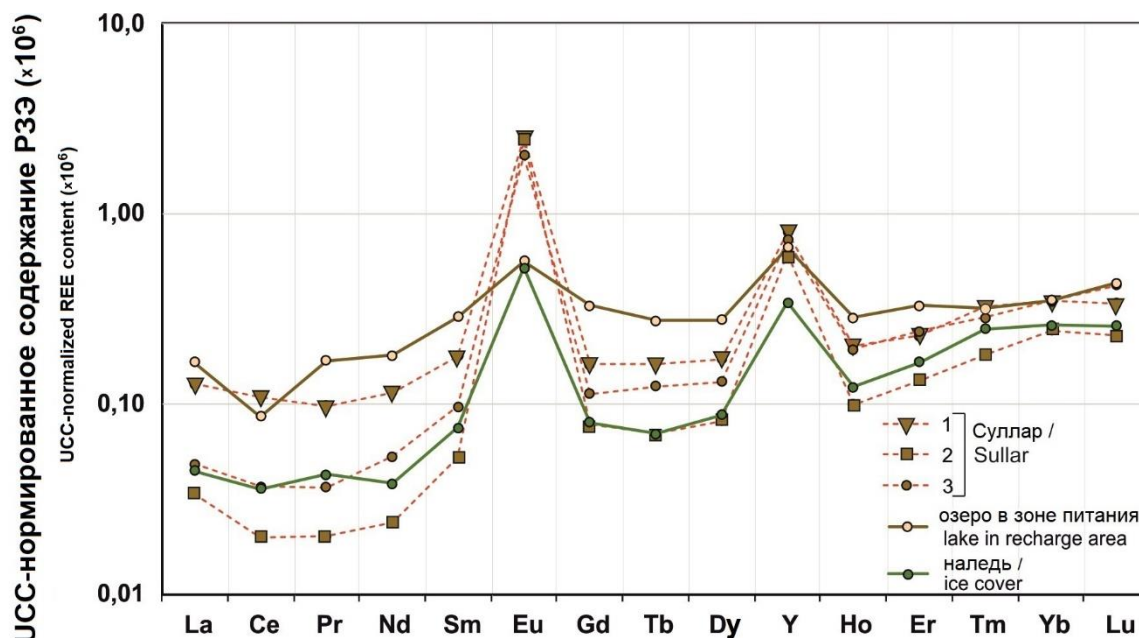


Рис. 6. Содержание редкоземельных элементов (РЗЭ) в воде источника Суллар, нормированное к их содержанию в верхней континентальной коре (upper continental crust (UCC)) по [28]

Fig. 6. Content of rare earth elements (REE) in Sullar water normalized to upper continental crust (UCC) according to [28]

Минеральный состав донных отложений и аутигенных минералов

Согласно проведенному анализу, в состав терригенных минералов входит кварц, полевые шпаты, магнетит, ильменит, циркон и рутил. Акцессорные минералы встречаются в виде микровключений в породообразующих минералах. Отмечаются также микровключения фосфатов РЗЭ, преимущественно с калиевыми полевыми шпатами (КПШ). Особого внимания заслуживают железо-карбонатные пленки вокруг терригенного материала. Мощность пленок не превышает 10 мкм (рис. 7, а), определить форму нахождения в них железа не представляется возможным. Вокруг зерен терригенного материала также формируются корки окислов и гидроокислов железа (рис. 7, б, в).

Осадок, выпавший непосредственно из воды источника Суллар (рис. 2, д, 6, д), в соответствии с результатами макро-микроструктурного и химического анализа, состоит преимущественно из окислов и/или гидроокислов железа (рис. 7, е). Слой 4, который, очевидно, осаждался первым (рис. 2, д), содержит практически исключительно минералы железа, в то время как в Слое 2 и ядре (Слой 3) возрастает количество кварца, в Слое 1 – КПШ. Наличие кварца и минералов класса алюмосиликатов, возможно, связано со сносом исходного обломочного материала с близлежащих отложений, и сопровождается их гидроген-

ной модификацией, поскольку проба воды, из которой выпал осадок аутигенных минералов, не была отфильтрована.

Удельные потоки и концентрация метана

Концентрация растворенного метана у дна в зоне разгрузки большого грифона составляла 4,15 мг/л, в зоне разгрузки малого грифона – 2,96 мг/л, у поверхности воды над местом разгрузки – 3,9 мг/л. В 10 м от выклинивания концентрация метана падала до 2,64 мг/л. Эти значения довольно высоки: так, в приповерхностном слое воды других исследованных нами озер центральной Якутии максимальная концентрация метана составляла 0,40 мг/л со средними значениями 0,35 мг/л для термокарстового озера и 0,04 мг/л для озера в центре аласной котловины.

Медианный УП метана с поверхности воды источника Суллар составлял 23,1 мгС/м²/ч, что несколько выше, чем УП с поверхности термокарстового озера, и значительно выше, чем УП из озера аласной котловины (рис. 8).

Состав микробных сообществ донных отложений

В образце корок вторичных минералов преобладали филумы *Pseudomonadota* и *Actinomycetota*, тогда как в образце элювия значительно преобладал филум *Pseudomonadota* (рис. 9).

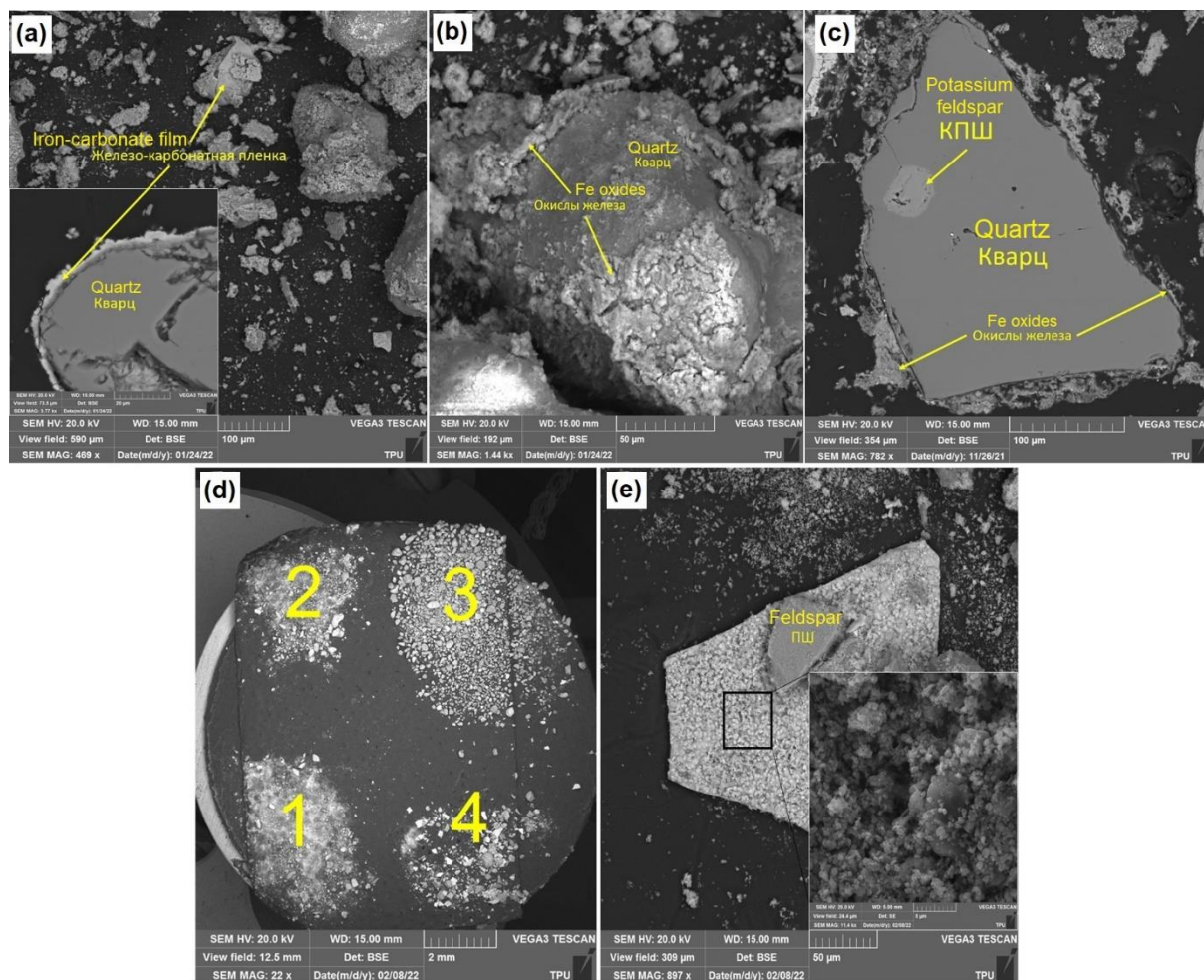


Рис. 7. СЭМ-изображения донных отложений источника Суллар: а) железо-карбонатная пленка вокруг вторичного материала; б, с) корки оксидов и/или гидрооксидов железа на зернах первичных минералов; д) осадок, выпавший из пробы воды с пронумерованными слоями (описание слоев 1–4 приведено в разделе «Методика. Анализ донных отложений и аутигенных минералов»); е) аморфная структура оксида и/или гидрооксида железа из Слоя 4

Fig. 7. SEM-images of bottom sediments of the Sullar spring: а) iron-carbonate film around the secondary material; б, с) crusts of Fe oxides and/or hydroxides on grains of primary minerals; д) sediment precipitated from the water sample with numbered layers (layers 1–4 are described in the «Методика. Анализ донных отложений и аутигенных минералов»); е) amorphous Fe oxide and/or hydroxide structure from Layer 4

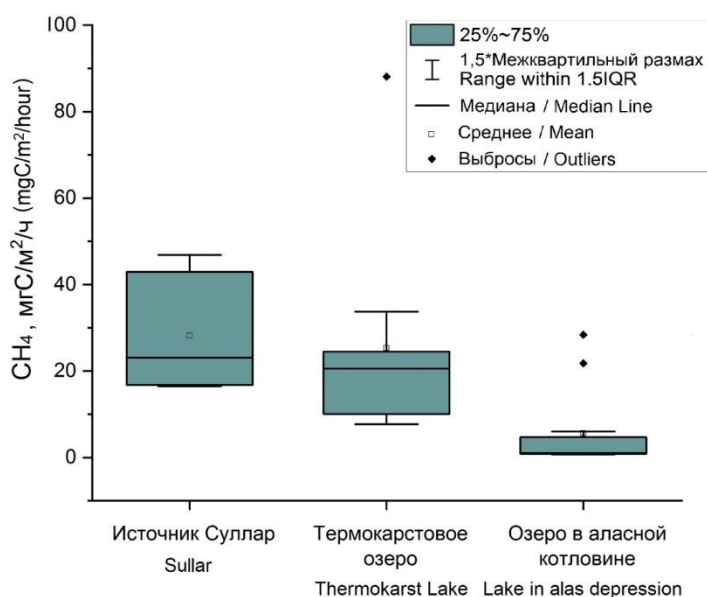


Рис. 8. Статистические характеристики удельных потоков метана с поверхности источника Суллар и озер Центральной Якутии

Fig. 8. Statistical parameters of methane fluxes from the water surface of the Sullar spring and lakes of Central Yakutia

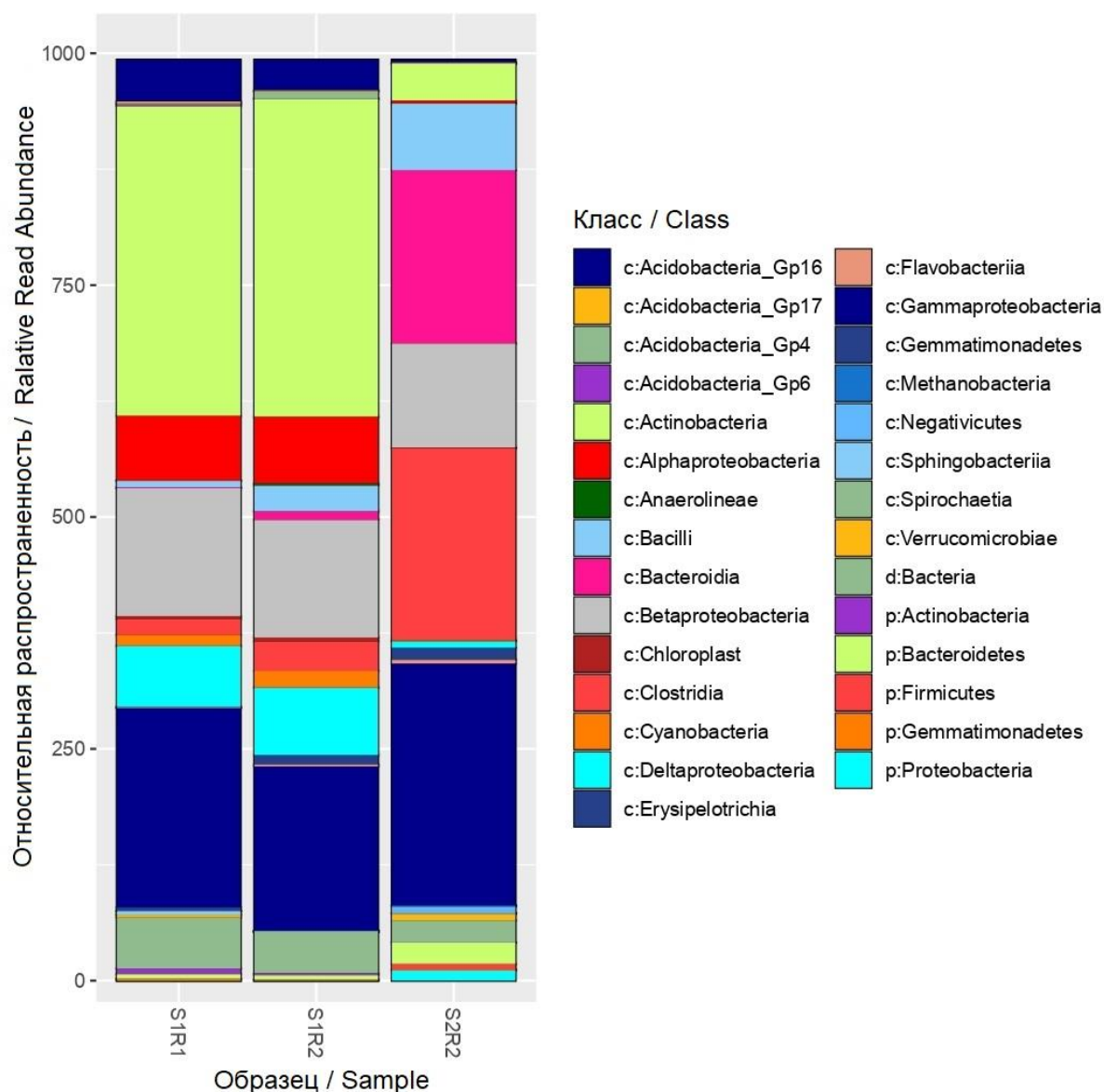


Рис 9. Относительная распространенность ОТЕ в исследуемых отложениях. S1R1 и S1R2 – ДНК, выделенные из образца корок вторичных минералов (в двух повторностях), S2R2 – ДНК, выделенные из элювиальных отложений, отобранных со дна источника

Fig. 9. Relative read abundance operational taxonomic unit in the studied waters. S1R1 and S1R2 – RNA, isolated from the sample of secondary mineral crust (in duplicate), S2R2 – RNA, isolated from eluvium collected from the spring bottom

Среди ОТЕ были выявлены потенциальные участники циклов железа и метана. Среди них преобладали представители родов *Crenothrix*, *Methylobacter*, *Methylothera*, *Geobacter*, *Gallionella*, а также семейств *Methylomonadaceae* и *Geobacteriaceae* [30].

Crenothrix polyspora, которому на 96,4 % родственны обнаруженные нами ОТЕ, является как известным окислителем железа, так и метанотрофом [31, 32]. Еще в XIX в. было показано, что *Crenothrix polyspora* образует слизистые и студенистые отложения оксида железа [33]. *Gallionella* (*G. ferruginea* – 98,0 % сходства с обнаруженным ОТЕ) [34] также является известной железобактерией. В работе [35] показано, что клетки *Gallionella* представляют собой «стебель», состоящий из фибрилл мико-

плазмодияльного клеточного тела, покрытых бактериальным оксидом железа [30].

В отличие от вышеупомянутых, семейство *Geobacteriaceae* и рода *Geobacter* *Desulfovibrio*, *Desulfuromonas* и *Rhodospirillum rubrum* включают в себя железоредущие бактерии, которые способны окислять органические соединения, используя Fe^{3+} в качестве акцептора электронов [36–39].

Метанотрофными бактериями являются представители рода *Methylobacter* (99,2 % – *M. psychrophilus* Z-0021^T) [40], а представители рода *Methylothera* – метилотрофными бактериями [41]. Семейство *Methylomonadaceae* включает аэробных потребителей одноуглеродных органических соединений, в том числе метана [42].

Следует отметить, что относительная распространенность потенциальных метанотрофов и железобактерий выше в отложениях элювия, отобранных со дна источника Суллар, в то время как корки вторичных минералов характеризуются большей распространенностью железовосстанавливающих бактерий. Распространенность потенциальных метаногенов в изучаемых отложениях в целом можно охарактеризовать как низкую, поскольку эти организмы являются строгими анаэробами.

Обсуждение

Модель вторичного минералообразования

Как уже было описано в методике на первом этапе моделирования были рассчитаны равновесные составы трех отобранных проб. Основным образующимся минералом является гетит (рис. 10). Он образуется во всех рассмотренных водах при естественных условиях (pH, Eh, температура). Наибольшее количество гетита выпадает в пробе 1 с наибольшим содержанием железа. Кроме гетита из воды образуется хлорит, его количество также наибольшее в пробе 1, но все же пренебрежительно мало по сравнению с количеством образующегося гетита и поэтому не показано на рисунке.

Таким образом, по данным расчетов, основным минералом, образующимся из природных вод источника Суллар, является гетит. Его образование является основным механизмом удаления из раствора Fe. Сделанный вывод согласуется с данными СЭМ, которая показала наличие корок окислов железа на терриген-

ном материале и преобладание (гидро)окислов железа в минеральном составе осадка, выпавшего из пробы воды источника Суллар в лабораторных условиях.

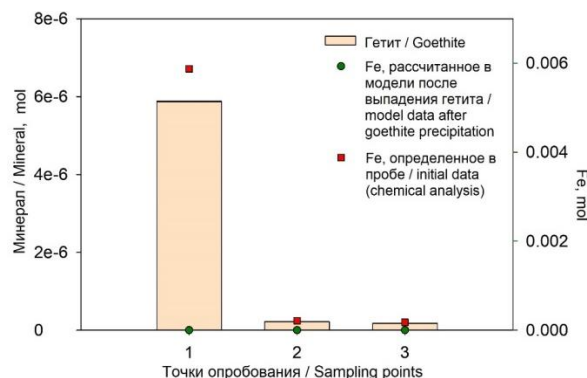


Рис. 10. Равновесный расчет вторичного минералообразования и содержания железа в водах источника Суллар

Fig. 10. Equilibrium calculation of secondary mineral formation and Fe content in the Sullar spring waters

Чтобы оценить влияние окислительно-восстановительных и кислотно-щелочных условий, а также температуры на вторичное минералообразование в природных водах источника Суллар мы экстраполировали значения этих показателей и рассчитали равновесия для пробы 1 в рамках выбранных диапазонов (рис. 11).

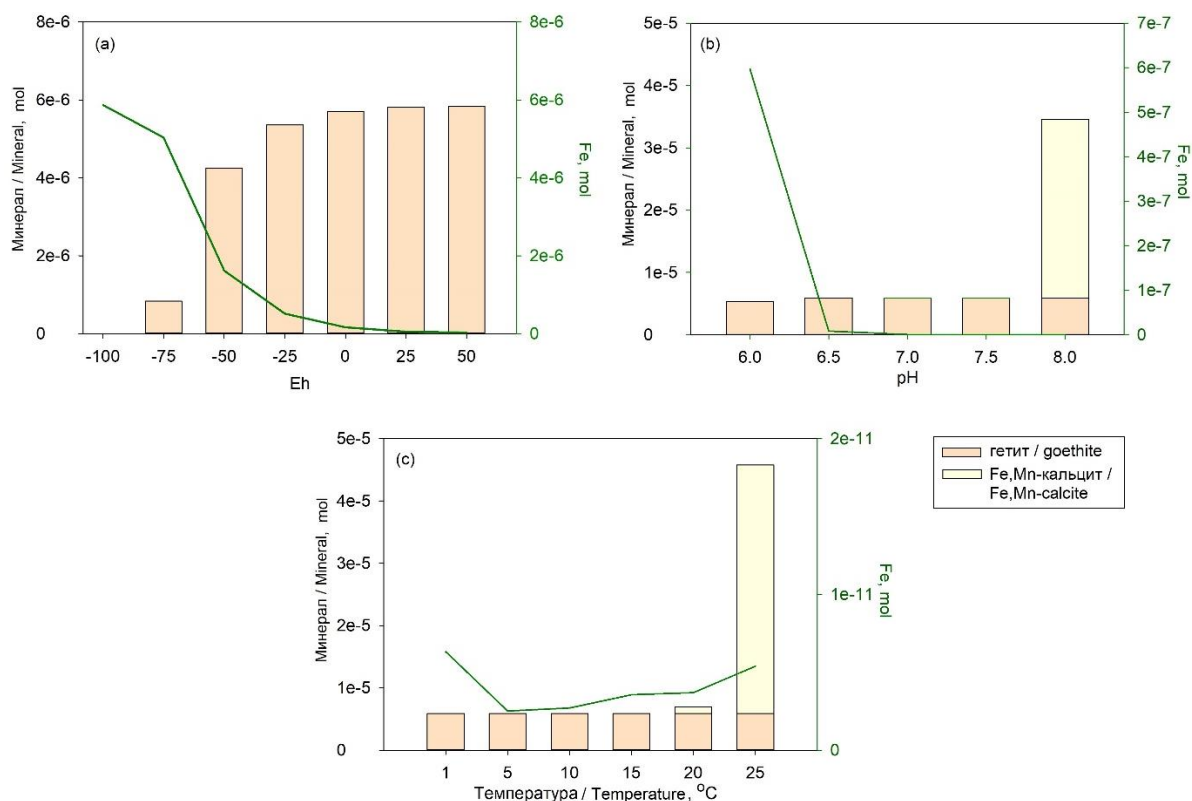


Рис. 11. Модельные данные вторичного минералообразования и содержания Fe в воде источника Суллар в зависимости от Eh (a), pH (b) и температуры (c)

Fig. 11. Model data on secondary mineral formation and Fe content in the Sullar spring water depending on Eh (a), pH (a) and temperature (c)

Основным фактором, контролирующим поведение Fe, как и следовало ожидать, оказалась величина Eh. В восстановительных условиях при значении Eh 100 mV все Fe находится в растворе в форме Fe^{2+} . С увеличением Eh часть Fe окисляется и выпадает в виде гетита, а в переходных окислительно-восстановительных условиях все заданное в баланс модели Fe выпадает в виде гетита (рис. 11, а). Расчет модели с изменяющимися окислительно-восстановительными условиями согласуется с натурными наблюдениями: уменьшением содержания Fe в пробах 2 и 3 (рис. 4), т. е. практически сразу после разгрузки источника, а также формированием обширных полей красно-бурых корок вторичных минералов в долине источника (рис. 2, а–с). Таким образом, можно заключить, что в области разгрузки межмерзлотных вод формируется окислительный (кислородный) геохимический барьер, в результате чего железо из хорошо растворимой восстановленной формы переходит в менее растворимую окисленную [4] с образованием (гидро)окислов железа.

Сдвиг величины pH в более кислую область имитирует, по нашему мнению, околоповерхностные условия в грифоне, и расчет показывает несколько меньшее образование гетита и удержание части Fe в растворенном виде (рис. 11, b). При увеличении pH количество образующегося гетита увеличивается, хотя и незначительно. При достижении значения pH 8,0, что имитирует кислотно-щелочные условия природных вод, находящихся в равновесии с атмосферой, из воды образуется кальцит, содержащий Fe и Mn. В образующемся кальците металлы распределяются следующим образом: Ca 92,5 %, Mn 0,075 %, Fe 6,9e-08 %. Иными словами, основная масса Fe выпадает в виде гетита, но небольшая его доля соосаждается с кальцитом. При настройке модели была также учтена возможность образования сидерита и родохрозита, как отдельных минеральных фаз Fe и Mn, однако они не осаждаются.

Удаление от места разгрузки межмерзлотных вод в физическом смысле также проявляется в увеличении температуры воды. Расчет равновесного состава пробы 1 при различных температурах демонстрирует образование гетита во всем интервале рассмотренных условий (рис. 11, d). При увеличении температуры до 20 °C начинает образовываться Fe,Mn-содержащий кальцит.

Осаждение Fe,Mn-содержащего кальцита при значительном увеличении pH и температуры согласуется с уменьшением концентрации Mn в пробе 3 (рис. 4), т. е. на значительном удалении от места разгрузки. Небольшое содержание Mn в железо-карбонатных пленках обнаруживается и по данным СЭМ.

Таким образом, вероятным механизмом образования железо-карбонатных пленок, обнаруженных на терригенном материале, является испарительное концентрирование при повышении температуры выходящих на поверхность межмерзлотных вод, а местами

и полным их испарении (рис. 2, а, с) в сочетании с увеличением pH при взаимодействии разгружающихся межмерзлотных вод с атмосферой. Железо связывается карбонатными пленками за счет функционирования сорбционного карбонатного барьера: в связи с малым значением произведения растворимости многих карбонатов двухвалентных элементов эти элементы еще до образования своих карбонатов соосаждаются с карбонатом кальция [4].

Влияние микробных сообществ на поток метана и осаждение вторичных минералов

Значительный поток метана с поверхности источника Суллар при крайне низкой относительной распространенности метаногенов в донных отложениях говорит о том, что метан поступает из межмерзлотного водоносного горизонта. Это подтверждает и высокая относительная распространённость метанотрофов в элювии. Наличие железовосстанавливающих бактерий на корках вторичных минералов, отобранных с высохших участков долины, говорит о том, что развитие этой функциональной группы микроорганизмов определяется образованием Fe-(гидро)окислов, а не наоборот. Таким образом, в данном случае железовосстанавливающие бактерии, не оказывают влияния на метаногенез, как было описано в работе [9]. При этом поток метана имеет скорее диффузионный характер. Сравнение источника Суллар и термокарстового озера Центральной Якутии, исследованного нами, показывает, что при почти равных УП метана с их поверхности (рис. 8) растворенная концентрация метана в воде термокарстового озера почти в 10 раз меньше, чем в воде источника Суллар. Из этого можно сделать вывод, что УП метана с поверхности термокарстового озера формируется за счет пузырьковой эмиссии, а измеренные УП метана с поверхности источника Суллар диффузионные.

Распространенность железоокисляющих бактерий в элювии, отобранном со дна источника, и опалесцирующие пленки на поверхности воды и корках вторичных минералов говорят о том, что в формирование (гидро)окислов железа вносят вклад не только геохимические, но и биохимические процессы.

Можно заключить, что растворенные метан и железо, поступающие при разгрузке межмерзлотных вод, начинают окисляться бактериальными сообществами в приповерхностных условиях. В совокупности со сменой геохимической обстановки деятельность микробных сообществ вызывает образование (гидро)окислов железа, а метан в значительном количестве эмитирует в атмосферу (рис. 12). Оценить масштабы окисления метана по имеющимся данным затруднительно, однако значительного подкисления водного раствора не происходит и УП метана с поверхности источника значительны, что позволяет сделать вывод о несущественности этого процесса, по крайней мере в непосредственной близости от зоны разгрузки, где проводились наблюдения.

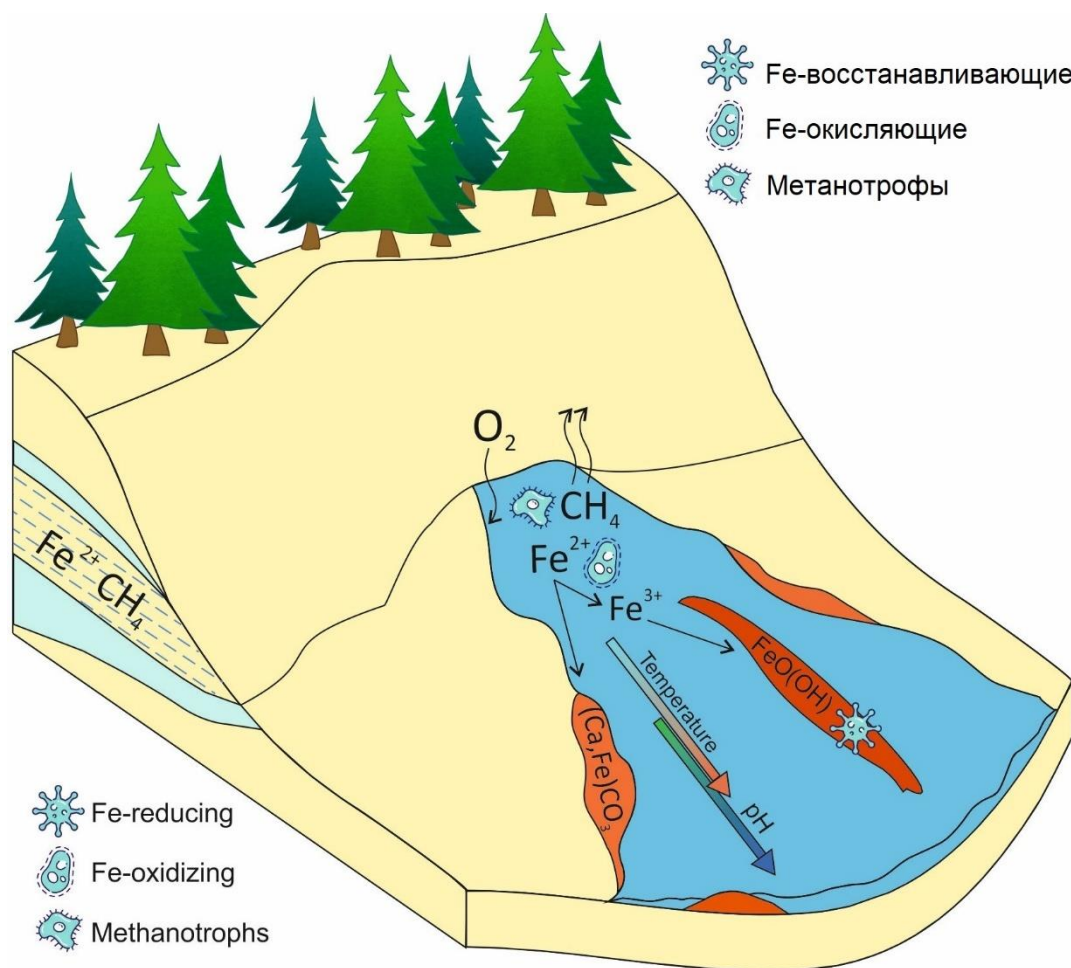


Рис. 12. Концептуальная модель формирования геохимических барьеров и их влияния на потоки метана и осаждение вторичных минералов в источнике Суллар

Fig. 12. Concept model of formation of biogeochemical barriers and their influence on methane fluxes and secondary mineral formation

Заключение

Результаты комплексного анализа геохимической обстановки источника Суллар, минерального и микробиологического состава его донных отложений позволяют заключить, что формирование вторичных (гидро)окислов железа тесно связано как со сменой геохимической обстановки при разгрузке межмерзлотных вод, так и с развитием железобактерий в донных отложениях источника. В области разгрузки межмерзлотных вод формируется окислительный геохимический барьер, в результате чего железо в присутствии железобактерий переходит из хорошо растворимой восстановленной формы в менее растворимую окисленную. Благоприятным условием для образования карбонатов является увеличение температуры и величины pH при взаимодействии разгружающихся межмерзлотных вод с атмосферой. Сорбционный карбонатный барьер обуславливает образование железо-карбонатных пленок, зафиксированных по данным СЭМ. Помимо железа на сорбционном карбонатном барьере осаждается и небольшое количество марганца.

Высокая относительная распространённость метанотрофов и низкое количество метаногенов в элю-

вии, отобранном со дна источника Суллар, указывает на то, что метан поступает из межмерзлотного водоносного горизонта и начинает окисляться бактериальными сообществами в приповерхностных условиях, однако значительная часть метана расходуется на эмиссию. Железобактерии обнаружены на уже сформировавшихся корках вторичных минеральных на высохших участках русла и почти отсутствуют в донном элювии, что исключает их влияние на метаногенез.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 21-55-75004 (экспедиционные исследования, общий химический и элементный анализ, определение удельных потоков метана) и программы развития Тюменского государственного университета (программа стратегического академического лидерства «Приоритет-2030»). Коллектив авторов благодарит Екатерину Сергеевну Караевскую (ФИЦ «Фундаментальные основы биотехнологии» РАН) за участие в полевых работах и помощь в обработке данных, а также выражает благодарность Александру Юрьевичу Меркелю, Александре Антоновне Ключиной и Николаю Алексеевичу Черных (ФИЦ «Фундаментальные основы биотехнологии» РАН) за проведение микробиологического анализа, а также Надежде Анатольевне Павловой (ИМЗ СО РАН) за предоставленные исторические данные.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ефимов А.И. Незаморазающий пресный источник Улахан-Тарын в Центральной Якутии // Исследования вечной мерзлоты в Якутской республике. – М.: Изд-во АН СССР, 1952. – Вып. 3. – С. 60–105.
- Гидрохимия подземных вод надмерзлотно-межмерзлотного стока на участках их разгрузки (центральная Якутия) / Н.А. Павлова, В.В. Шепелев, А.А. Галанин, В.С. Ефремов // Водные ресурсы. – 2020. – Т. 47. – № 4. – С. 391–401.
- Estimation of the residence time of permafrost groundwater in the middle of the Lena River basin, eastern Siberia / T. Hiyama, K. Asai, A. Kolesnikov, L. Gagarin, V. Shepelev // Environmental Research Letters. – 2013. – V. 8. – 035040.
- Крайнов С.Р., Рыженко Б.Н., Швеи В.М. Геохимия подземных вод. Теоретические, прикладные и экологические аспекты. – М.: ЦентрЛитНефтеГаз, 2012. – 672 с.
- Metal speciation in water of the flooded mine «Arsenic» (Karelia, Russia): equilibrium-kinetic modeling with a focus on the influence of humic substances / E.V. Cherkasova, A.A. Konyshyev, E.A. Soldatova et al. // Aquatic Geochemistry. – 2011. – V. 27. – P. 141–158.
- Sidkina E.S., Mironenko M.V., Cherkasova E.V. Application of equilibrium-kinetic modeling for predicting the chemical composition of subdump waters of the Udokan deposit (Russia) // Geochemistry International. – 2020. – V. 58. – P. 1419–1429.
- Geochemical conditions of natural wetland and paddy fields in the Poyang Lake area, China / E. Soldatova, Y. Dong, J. Li et al. // SN Applied Sciences. – 2021. – V. 3. – Article 134.
- Iron redistribution upon thermokarst processes in the Yedoma Domain / A. Monhonval, J. Strauss, E. Mauclet, C. Hirst, N. Bemelmans, G. Grosse, L. Schirmeister, M. Fuchs, S. Opfergelt // Frontiers in Earth Science. – 2021. – V. 9. – Article 629.
- Free iron and iron-reducing microorganisms in permafrost and permafrost-affected soils of northeastern Siberia / E.M. Rivkina, D.G. Fedorov-Davydov, A.G. Zakharyuk, V.A. Shcherbakova, T.A. Vishnivetskaya // Eurasian Soil Science. – 2020. – № 53. – P. 1455–1468.
- Иванов М.С. Криогенное строение четвертичных отложений Лено-Алданской впадины. – Новосибирск: Наука, 1984. – 126 с.
- Спектор В.В., Бакулина Н.Т., Спектор В.Б. Рельеф и возраст аллювиального покрова долины р. Лены на «Якутском разбеге» // Геоморфология. – 2008. – № 1. – С. 87–94.
- Камалетдинов В.А., Минюк П.С. Строение и характеристика отложений Бестяхской террасы // Бюллетень Комиссии по изучению четвертичного периода. – 1991. – № 6. – С. 68–78.
- Рельеф, строение и возраст четвертичных отложений долины р. Лены в Якутской излучине / С.А. Правкин, Д.Ю. Большинов, О.А. Поморцев, Л.А. Савельева, А.Н. Молодьков, М.Н. Григорьев, Х.А. Арсланов // Вестник СПбГУ. Науки о Земле. – 2018. – Т. 63. – Вып. 2. – С. 209–229.
- Новые данные о строении и возрасте Бестяхской террасы реки Лены в окрестностях Якутска (Усть-Ботомское обнажение) / А.А. Галанин, Р.Н. Курбанов, Г.И. Шапошников, А.Н. Васильева, В.М. Лыткин // Пути эволюционной географии: Материалы II Всероссийской научной конференции, посвященной памяти профессора А.А. Величко. – М.: ИГ РАН, 2021. – Вып. 2. – С. 76–81.
- Тананаев Н.И., Котов П.И. Палеоклимат и криолитозона центральной Якутии в позднем плейстоцене и голоцене // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России: Материалы XI Всероссийской научно-практической конференции. – Якутск: Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова, 2021. – С. 436–439.
- Бойцов А.В. Условия формирования и режим подземных вод надмерзлотно и межмерзлотно стока в Центральной Якутии: автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – Якутск: ИМЗ СО РАН, 2002. – 23 с.
- Химический состав подземных вод межмерзлотных таликов в центральной Якутии / Н.А. Павлова, А.Б. Колесников, В.С. Ефремов, В.В. Шепелев // Водные ресурсы. – 2016. – Т. 43. – № 2. – С. 216–227.
- Methane emissions from lakes: dependence of lake characteristics, two regional assessments, and a global estimate / D. Bastviken, J. Cole, M. Pace, L. Tranvik // Global Biogeochemical Cycles. – 2004. – V. 18. – GB4009.
- Methane emissions from Pantanal, South America, during the low water season: toward more comprehensive sampling / D. Bastviken, A.L. Santoro, H. Marotta et al. // Environmental Science & Technology. – 2010. – V. 44. – № 14. – P. 5450–5455.
- An improved dual-indexing approach for multiplexed 16S rRNA gene sequencing on the Illumina MiSeq platform / D.W. Fadrosh, B. Ma, P. Gajer, N. Sengamalay, S. Ott, R.M. Brotman, J. Ravel // Microbiome. – 2014. – V. 2 (1). – Article 6.
- DegePrime, a program for degenerate primer design for broad-taxonomic-range PCR in microbial ecology studies / L.W. Hugerth, H.A. Wefer, S. Lundin, H.E. Jakobsson, M. Lindberg, S. Rodin, L. Engstrand, A.F. Andersson // Applied and Environmental Microbiology. – 2014. – V. 80 (16). – P. 5116–5123.
- Анализ систем праймеров на ген 16S рРНК для профилирования термофильных микробных сообществ / А.Ю. Меркель, И.Ю. Тарновецкий, О.А. Подосокорская, С.В. Тошаков // Микробиология. – 2019. – Т. 88. – № 6. – С. 655–664.
- Reproducible, interactive, scalable and extensible microbiome data science using QIIME 2 / E. Bolyen, J.R. Rideout, M.R. Dillon et al. // Nature Biotechnology. – 2019. – V. 37 (8). – P. 852–857.
- SILVAngs 1.4 pipeline. URL: <https://ngs.arb-silva.de/silvangs/> (дата обращения 26.07.2021).
- BLAST URL: <http://blast.ncbi.nlm.nih.gov/Blast.cgi> (дата обращения 26.07.2021).
- Шваров Ю.В. HCh: новые возможности термодинамического моделирования геохимических систем, предоставляемые Windows // Геохимия. – 2008. – № 8. – С. 898–903.
- Möller P., Dulski P., De Lucia M. REY patterns and their natural anomalies in waters and brines: The correlation of Gd and Y anomalies // Hydrology. – 2021. – V. 8 (3). – Article 116.
- Rudnick R.L., Gao S. 3.01 – Composition of the Continental Crust // Treatise on Geochemistry / Eds. H.D. Holland, K.K. Turekian. – Oxford: Pergamon, 2003. – V. 3. – P. 1–64.
- Ohta A., Kawabe I. REE(III) adsorption onto Mn dioxide (δ -MnO₂) and Fe oxyhydroxide: Ce(III) oxidation by δ -MnO₂ // Geochimica et Cosmochimica Acta. – 2001. – V. 65. – P. 695–703.
- Изучение прокариотного разнообразия сезонно-талого слоя районов Нелегер и Суллар (Центральная Якутия) с помощью профилирования V4 фрагмента гена 16S рРНК / Е.С. Караевская, М.Ю. Чербунина, А.Ю. Меркель, Л.А. Кривенко, В.С. Казанцев, Е.А. Солдатова, В.С. Ефремов, Н.И. Тананаев // Мониторинг в криолитозоне: Шестая конференция геокриологов России. – Москва, МГУ им. М.В. Ломоносова, 2022. – С. 1055–1062.
- Crenothrix are major methane consumers in stratified lakes / K. Oswald, J.S. Graf, S. Littmann, D. Tienken, A. Brand, B. Wehrli, J. Milucka // The ISME journal. – 2017. – V. 11. – № 9. – P. 2124–2140.
- Cohn's Crenothrix is a filamentous methane oxidizer with an unusual methane monooxygenase / K. Stoecker, B. Bending, B. Schöning, P.H. Nielsen, J.L. Nielsen, C. Baranyi, E.R. Toenshoff, H. Daims, M. Wagner // Proceedings of the national academy of sciences. – 2006. – V. 103 (7). – P. 2363–2367.
- Cohn F. Über den Brunnenfaden (Crenothrix polyspora) mit Bemerkungen fiber die mikroskopische Analyse des Brunnenwassers // Beiträge zur Biologie der Pflanzen. – 1870. – V. 1. – P. 108–131.
- Hallbeck L.E.L., Pedersen K. Gallionella. Bergey's Manual of Systematics of Archaea and Bacteria. – USA: John Wiley & Sons, Inc., in association with Bergey's Manual Trust, 2015. – P. 1–10.
- Anderson C.R., Pedersen K. In situ growth of Gallionella biofilms and partitioning of lanthanides and actinides between biological material and ferric oxyhydroxides // Geobiology. – 2003. – V. 1 (2). – P. 169–178.
- Childers S.E., Ciuffo S., Lovley D.R. Geobacter metallireducens accesses insoluble Fe(III) oxide by chemotaxis // Nature. – 2002. – № 416. – P. 767–769.
- Finneran K.T., Johnsen C.V., Lovley D.R. Rhodoferrax ferrireducens sp. nov., a psychrotolerant, facultatively anaerobic bacterium that oxidizes acetate with the reduction of Fe(III) // International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology. – 2003. – № 53 (Pt 3). – P. 669–673.

38. *Desulfuromonas svalbardensis* sp. nov. and *Desulfuromusa ferrireducens* sp. nov., psychrophilic, Fe(III)-reducing bacteria isolated from Arctic sediments, Svalbard / V. Vandieken, M. Mußmann, H. Niemann, B.B. Jørgensen // International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology. – 2006. – № 56 (Pt 5). – P. 1133–1139.
39. Водяницкий Ю.Н., Шелоболina Е.С. Биологическая редукция (гидр)оксидов железа (III) в почвах и роль природного органического вещества в этом процессе // Агрохимия. – 2007. – № 8. – P. 87–96.
40. The phylogenetic position of *Methylobacter psychrophilus* sp. nov. / T.P. Tourova, M.V. Omel'chenko, K.V. Fegeding, L.V. Vasil'eva // Microbiology (Mikrobiologiya). – 1999. – Т. 68. – № 4. – С. 493–495.
41. Novel methylotrophic isolates from lake sediment, description of *Methylotenera versatilis* sp. nov. and emended description of the genus *Methylotenera* / M.G. Kalyuzhnaya, D.A. Beck, A. Vorobev, N. Smalley, D.D. Kunkel, M.E. Lidstrom, L. Chistoserdova // International journal of systematic and evolutionary microbiology. – 2012. – V. 62. – № 1. – P. 106–111.
42. Anaerobic oxidation of methane and associated microbiome in anoxic water of Northwestern Siberian lakes / L. Cabrol, F. Thalasso, L. Gandois, A. Sepulveda-Jauregui, K. Martinez-Cruz, R. Teisserenc, N. Tananaev, A. Tveit, M.M. Svenning, M. Barret // Science of the Total Environment. – 2020. – V. 736. – 139588.

Поступила: 18.04.2023 г.

Прошла рецензирование: 23.06.2023 г.

Информация об авторах

Солдатова Е.А., кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник Центра изотопной биогеохимии, Тюменский государственный университет; младший научный сотрудник, Геологический институт РАН.

Сидкина Е.С., кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, Геологический институт РАН.

Кирюхин Б.А., аспирант, младший научный сотрудник лаборатории AquaBioSafe, Тюменский государственный университет.

Максимов П.Н., аспирант Инженерной школы природных ресурсов, Национальный исследовательский Томский политехнический университет.

Кривенко Л.А., младший научный сотрудник, Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН.

Иванов В., аспирант, лаборант-исследователь Лаборатории седиментологии и эволюции палеобиосферы, Тюменский государственный университет.

Тананаев Н.И., кандидат географических наук, ведущий научный сотрудник, Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН; заведующий лабораторией, Институт естественных наук, Северо-Восточный федеральный университет.

UDC 550.47

GEOCHEMICAL CONDITIONS OF SULLAR SPRING: FORMATION OF AUTHIGENIC MINERALS AND METHANE FLUXES

Evgeniya A. Soldatova^{1,2},
2a61@mail.ru

Evgeniya S. Sidkina²,
SidkinaES@yandex.ru

Bogdan A. Kiriukhin¹,
bogdan.kirukhin67@gmail.com

Prokopi N. Maximov³,
pnm1@tpu.ru, yakutprosh@gmail.com

Liudmila A. Krivenok⁴,
krivenok@ifaran.ru

Vladimir Ivanov¹,
v.ivanov@utmn.ru

Nikita I. Tananaev^{5,6},
tanni@s-vfu.ru

¹ University of Tyumen,
6, Volodarsky street, Tyumen, 625003, Russia.

² Geological Institute RAS,
7, bld. 1, Pyzhevsky lane, Moscow, 119017, Russia.

³ National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

⁴ A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS,
3, Pyzhevsky lane, Moscow, 119017, Russia.

⁵ P.I. Melnikov Permafrost Institute SB RAS,
36, Merzlotnaya street, Yakutsk, 670010, Russia.

⁶ North-Eastern Federal University,
46, Kulakovskiy street, Yakutsk, 670013, Russia.

Relevance and the research object. Interpermafrost aquifers and areas of their discharge with seasonal ice covers are special permafrost-hydrogeological and hydrochemical systems that are not typical for the thick continuous permafrost zone of Central Yakutia. Differences in chlorofluorocarbon content indicate the anaerobic conditions of some springs suggesting microbial degradation of these compounds by methanogenic bacteria. In the discharge area of such springs, a sharp change in the geochemical conditions takes place leading to a transformation in the water chemical composition and boosting the processes of authigenic mineral formation in this buffer area. In current work we considered the geochemical system of the Sullar spring – the most northern and the least studied among interpermafrost groundwater discharge zones of the Lena River right bank. Intensive accumulation of authigenic minerals was found in the Sullar discharge area during field research. It was Fe compounds with bacterial mats as an opalescent film. Some researchers state the connection between the transformation of Fe compounds during permafrost melting and organic matter migration and transformation, including its consumption by microorganisms with further methane emission. We assumed that there is a relationship between the authigenic mineral formation and methane content and emission in the spring discharge area. This research is the first comprehensive description of the hydrochemistry of the interpermafrost water of the Sullar spring.

The aim of the research was to explore the influence of geochemical conditions and microbial communities on formation of authigenic minerals and methane fluxes, in particular the effect of the change in geochemical conditions due to groundwater discharge on Fe precipitation; to analyze the relation of that process with methane fluxes. For this purpose, we study water chemical composition of the Sullar spring, measure methane fluxes from water surface and analyze mineral and microbial composition of secondary mineral crusts and bottom eluvium collected near water sampling points.

Methods. The main element content was determined by ion chromatography. The concentrations of the bicarbonate ion and dissolved carbon dioxide were calculated by the equilibrium modeling method based on the pH and Eh values of the system. The content of trace elements was measured by mass spectrometry with inductively coupled plasma. To identify seasonal and annual variability, a retrospective analysis of chemical composition of the Sullar spring water for the period from 1962 to 2020 was carried out. Methane fluxes were measured using the chamber method. The methane concentration was determined by gas chromatography with a flame ionization detector. The features of the secondary mineral crusts and bottom eluvium were determined using a petrographic microscope. The chemical composition of individual mineral phases was evaluated using a scanning electron microscope equipped with a detector for energy dispersive X-ray spectral microanalysis. The DNA concentration was measured on a fluorimeter. Amplicon libraries were generated by polymer chain reaction with universal primers for the V4 region. Equilibrium modeling was carried out using the HCh software.

Results and conclusions. Results of thermodynamic modeling showed that the main mineral precipitated from the solution was goethite. Its formation is the predominant mechanism of Fe output from the water solution. The oxidative (oxygen) geochemical barrier was simulated in the model by changing the redox conditions. Model data imitated the redox condition change due to groundwater discharge was in good agreement with field observations and lab research: the decrease of Fe content right after groundwater discharge and formation of reddish mineral crusts in the Sullar valley. Fe (hydro)oxides crusts on terrigenous material and the prevalence of Fe (hydro)oxides among minerals precipitated from the Sullar water sample in laboratory conditions were identified by scanning electron microscopy. It was concluded that

Fe output from the water solution is connected with the formation of (hydro)oxides due to the oxidation of a highly soluble reduced form to a less soluble oxidized one in the presence of oxygen. The mechanism for forming iron-carbonate films found on terrigenous material is evaporative concentration combined with the increase in pH due to the interaction of interpermafrost waters with the atmosphere. Carbonate films bind Fe due to the functioning of the sorption carbonate barrier: low values of the solubility product of carbonates of divalent elements lead to the co-precipitation of these elements with calcium carbonate. In addition to Fe, a small amount of Mn is also accumulated on the carbonate sorption barrier. The high relative abundance of methanotrophs and the low abundance of methanogens in bottom eluvium from the Sullar spring indicate that methane comes from the aquifer, and bacteria oxidize it after groundwater discharge. Iron-reducing bacteria were found on the secondary mineral crusts in the dry sections of the spring channel. In bottom eluvium, the iron-reducing bacteria are almost absent, which excludes their influence on methanogenesis.

Key words:

Interpermafrost groundwater, carbon cycle, iron cycle, greenhouse gases, secondary minerals, microbial abundance, Central Yakutia.

The research was supported by RFBR 21-55-75004 (field research, analysis of water chemical composition, measurement of methane fluxes) and the University of Tyumen (strategic academic leadership program «Priority-2030»). The authors thanks Ekaterina S. Karaevskaya (Research Center of Biotechnology RAS) for participation in field work and assistance in data processing, and also expresses gratitude to Alexandr Yu. Merkel, Alexandra A. Klyukina and Nikolay A. Chernykh (Research Center of Biotechnology RAS) for microbiological analysis, and Nadezhda A. Pavlova (P.I. Melnikov Permafrost Institute SB RAS) for historical data.

REFERENCES

1. Efimov A.I. Nezamerzayushchy presnyy istochnik Ulakhan-Taryn v Tsentralnoy Yakutii [Non-freezing fresh spring Ulakhan-Taryn in Central Yakutia]. *Issledovaniya vechnoy merzloty v Yakutskoy respublike* [Permafrost studies in the Yakut Republic]. Moscow, AN SSSR Publ., 1952. Vol. 3, pp. 60–105.
2. Pavlova N.A., Shepelev V.V., Galanin A.A., Efremov V.S. Gidrokimiya podzemnykh vod nadmerzlotno-mezhmerzlotnogo stoka na uchastkakh ikh razgruzki (tsentralnaya Yakutiya) [Hydrochemistry of groundwater of supra-permafrost-inter-permafrost runoff at the sites of their discharge (central Yakutia)]. *Vodnye resursy*, 2020, vol. 47, no. 4, pp. 391–401.
3. Hiyama T., Asai K., Kolesnikov A., Gagarin L., Shepelev V. Estimation of the residence time of permafrost groundwater in the middle of the Lena River basin, eastern Siberia. *Environmental Research Letters*, 2013, vol. 8, 035040.
4. Kraynov S.R., Ryzhenko B.N., Shvets V.M. *Geokhimiya podzemnykh vod. Teoreticheskie, prikladnye i ekologicheskie aspekty* [Geochemistry of underground waters. Theoretical, applied and ecological aspects]. Moscow, Oil gas literature center Publ., 2012. 672 p.
5. Cherkasova E.V., Konyshov A.A., Soldatova E.A. Metal speciation in water of the flooded mine «Arsenic» (Karelia, Russia): equilibrium-kinetic modeling with a focus on the influence of humic substances. *Aquatic Geochemistry*, 2011, vol. 27, pp. 141–158.
6. Sidkina E.S., Mironenko M.V., Cherkasova E.V. Application of equilibrium-kinetic modeling for predicting the chemical composition of subdump waters of the Udokan deposit (Russia). *Geochemistry International*, 2020, vol. 58, pp. 1419–1429.
7. Soldatova E., Dong Y., Li J. Geochemical conditions of natural wetland and paddy fields in the Poyang Lake area, China. *SN Applied Sciences*, 2021, vol. 3, article 134.
8. Monhonval A., Strauss J., Mauclet E., Hirst C., Bemelmans N., Grosse G., Schirmermeister L., Fuchs M., Opfergelt S. Iron redistribution upon thermokarst processes in the Yedoma Domain. *Frontiers in Earth Science*, 2021, vol. 9, article 629.
9. Rivkina E.M., Fedorov-Davydov D.G., Zakharyuk A.G., Shcherbakova V.A., Vishnivetskaya T.A. Free iron and iron-reducing microorganisms in permafrost and permafrost-affected soils of northeastern Siberia. *Eurasian Soil Science*, 2020, no. 53, pp. 1455–1468.
10. Ivanov M.S. *Kriogennoe stroenie chetvertichnykh otlozheniy Leno-Aldanskoy vpadiny* [Cryogenic structure of Quaternary deposits of the Lena-Aldan Depression]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1984. 126 p.
11. Spektor V.V., Bakulina N.T., Spektor V.B. Relief and age of the alluvial cover of the Lena River valley at the «Yakutsk Raid». *Geomorphology*, 2008, no. 1, pp. 87–94.
12. Kamaletdinov V.A., Minyuk P.S. Stroenie i kharakteristika otlozheniy Bestyakhskoy terrasy [Structure and characteristics of deposits of the Bestyakhskaya terrace]. *Byulleten Komissii po izucheniyu chetvertichnogo perioda*, 1991, no. 6, pp. 68–78.
13. Pravkin S.A., Bolshiyakov D.Yu., Pomortsev O.A., Saveleva L.A., Molodkov A.N., Grigorev M.N., Arslanov H.A. Relief, stroenie i vozrast chetvertichnykh otlozheniy doliny r. Leny v Yakutskoy izluchine [Relief, structure and age of the Quaternary deposits of the valley of the river. Lena in the Yakutsk bend]. *Vestnik SPbGU. Nauki o Zemle*, 2018, vol. 63, no. 2, pp. 209–229.
14. Galanin A.A., Kurbanov R.N., Shaposhnikov G.I., Vasileva A.N., Lytkin V.M. Novye dannye o stroenii i vozraste Bestyakhskoy terrasy reki Leny v okrestnostyakh Yakutska (Ust-Botomskoe obnazhenie) [New data on the structure and age of the Bestyakhskaya terrace of the Lena River in the vicinity of Yakutsk (Ust-Botom outcrop)]. *Puti evolyutsionnoy geografii. Materialy II Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii, posvyashchennoy pamyati professora A.A. Velichko* [Ways of evolutionary geography. Proceedings of the II All-Russian Scientific Conference dedicated to the memory of Professor A.A. Velichko]. Moscow, IG RAN Publ., 2021. No. 2, pp. 76–81.
15. Tananaev N.I., Kotov P.I. Paleoklimat i kriolitizona tsentralnoy Yakutii v pozdnem pleystotsene i golotsene [Paleoclimate and permafrost zone of Central Yakutia in the late Pleistocene and Holocene]. *Geologiya i mineralno-syryevye resursy Severo-Vostoka Rossii. Materialy XI Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Geology and mineral resources of the North-East of Russia. Proc. of the XI All-Russian scientific and practical conference]. Yakutsk, 2021. pp. 436–439.
16. Boytsov A.V. *Usloviya formirovaniya i rezhim podzemnykh vod nadmerzlotnogo i mezhmerzlotnogo stoka v Tsentralnoy Yakutii*. Avtoreferat Dis. Kand. nauk [Formation conditions and groundwater regime of supra-permafrost and inter-permafrost runoff in Central Yakutia Cand. Diss. Abstract]. Yakutsk, 2002. 23 p.
17. Pavlova N.A., Kolesnikov A.B., Efremov V.S., Shepelev V.V. Khimicheskiy sostav podzemnykh vod mezhmerzlotnykh talikov v tsentralnoy Yakutii [Chemical composition of groundwater in interpermafrost taliks in central Yakutia]. *Vodnye resursy*, 2016, vol. 43, no 2, pp. 216–227.
18. Bastviken D., Cole J., Pace M., Tranvik L. Methane emissions from lakes: Dependence of lake characteristics, two regional assessments, and a global estimate. *Global Biogeochemical Cycles*, 2004, vol. 18, GB4009.
19. Bastviken D., Santoro A. L., Marotta H. Methane emissions from Pantanal, South America, during the low water season: toward more comprehensive sampling. *Environmental Science & Technology*, 2010, vol. 44, no. 14, pp. 5450–5455.
20. Fadrosch D.W., Ma B., Gajer P., Sengamalai N., Ott S., Brotman R.M., Ravel J. An improved dual-indexing approach for multiplexed 16S rRNA gene sequencing on the Illumina MiSeq platform. *Microbiome*, 2014, vol. 2 (1), 6.
21. Hugerth L.W., Wefer H.A., Lundin S., Jakobsson H.E., Lindberg M., Rodin S., Engstrand L., Andersson A.F. DegePrime, a program for

- degenerate primer design for broad-taxonomic-range PCR in microbial ecology studies. *Applied and Environmental Microbiology*, 2014, vol. 80 (16), pp. 5116–5123.
22. Merkel A.Yu., Tarnovetskiy I.Yu., Podosokorskaya O.A., Toshchakov S.V. Analiz sistem praymerov na gen 16S rRNA dlya profilirovaniya termofilnykh mikrobykh soobshchestv [Analysis of primer systems for the 16S rRNA gene for profiling thermophilic microbial communities]. *Mikrobiologiya*, 2019, vol. 88, no 6, pp. 655–664.
 23. Bolyen E., Rideout J.R., Dillon M.R. Reproducible, interactive, scalable and extensible microbiome data science using QIIME 2. *Nature Biotechnology*, 2019, vol. 37 (8), pp. 852–857.
 24. SILVAngs 1.4 pipeline. Available at: <https://ngs.arb-silva.de/silvangs/> (accessed 26 July 2021).
 25. BLAST. Available at: <http://blast.ncbi.nlm.nih.gov/Blast.cgi> (accessed 26 July 2021).
 26. Shvarov Yu.V. HCh: novye vozmozhnosti termodinamicheskogo modelirovaniya geokhimicheskikh sistem, predstavlyaemye Windows [HCh: new opportunities for thermodynamic modeling of geochemical systems provided by Windows]. *Geokhimiya*, 2008, no 8, pp. 898–903.
 27. Möller P., Dulski P., De Lucia M. REY patterns and their natural anomalies in waters and brines: The correlation of Gd and Y anomalies. *Hydrology*, 2021, vol. 8 (3), 116.
 28. Rudnick R.L., Gao S. 3.01 – Composition of the Continental Crust. *Treatise on Geochemistry*. Eds. H.D. Holland, K.K. Turekian. Oxford, Pergamon, 2003. Vol. 3, pp. 1–64.
 29. Ohta A., Kawabe I. REE(III) adsorption onto Mn dioxide (δ -MnO₂) and Fe oxyhydroxide: Ce(III) oxidation by δ -MnO₂. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2001, vol. 65, pp. 695–703.
 30. Karaevskaya E.S., Cherbunina M.Yu., Merkel A.Yu., Krivenok L.A., Kazantsev V.S., Soldatova E.A., Efremov V.S., Tananaev N.I. Izuchenie prokariotnogo raznoobraziya sezonno-talogo sloya rayonov Neleger i Sullar (Tsentralnaya Yakutiya) s pomoshchyu profilirovaniya V4 fragmenta gena 16S rRNA [Study of the prokaryotic diversity of the seasonally thawed layer of the Neleger and Sullar regions (Central Yakutia) using profiling of the V4 fragment of the 16S rRNA gene]. *Shestaya konferentsiya geokriologov Rossii. Monitoring v kriolitozone* [Sixth Conference of Geocryologists of Russia. Monitoring in permafrost]. Moscow, Lomonosov Moscow State University Press, 2022. pp. 1055–1062.
 31. Oswald K., Graf J.S., Littmann S., Tienken D., Brand A., Wehrli B., Milucka J. Crenothrix are major methane consumers in stratified lakes. *The ISME journal*, 2017, vol. 11, no. 9, pp. 2124–2140.
 32. Stoecker K., Bendinger B., Schöning B., Nielsen P.H., Nielsen J.L., Baranyi C., Toenshoff E.R., Daims H., Wagner, M. Cohn's Crenothrix is a filamentous methane oxidizer with an unusual methane monooxygenase. *Proceedings of the national academy of sciences*, 2006, vol. 103 (7), pp. 2363–2367.
 33. Cohn F. Über den Brunnenfaden (Crenothrix polyspora) mit Bemerkungen fiber die mikroskopische Analyse des Brunnenwassers [About the well thread (Crenothrix polyspora) with comments on the microscopic analysis of the well water]. *Beiträge zur Biologie der Pflanzen*, 1870, vol. 1, pp. 108–131.
 34. Hallbeck L.E.L., Pedersen K. Gallionella. *Bergey's Manual of Systematics of Archaea and Bacteria*. USA, John Wiley & Sons, Inc., in association with Bergey's Manual Trust, 2015. pp. 1–10.
 35. Anderson C.R., Pedersen K. In situ growth of Gallionella biofilms and partitioning of lanthanides and actinides between biological material and ferric oxyhydroxides. *Geobiology*, 2003, vol. 1 (2), pp. 169–178.
 36. Childers S.E., Ciufu S., Lovley D.R. Geobacter metallireducens accesses insoluble Fe(III) oxide by chemotaxis. *Nature*, 2002, no. 416, pp. 767–769.
 37. Finneran K.T., Johnsen C.V., Lovley D.R. Rhodoferrax ferrireducens sp. nov., a psychrotolerant, facultatively anaerobic bacterium that oxidizes acetate with the reduction of Fe(III). *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 2003, no. 53 (Pt 3), pp. 669–673.
 38. Vandieken V., Mußmann M., Niemann H., Jørgensen B.B. Desulfuromonas svalbardensis sp. nov. and Desulfuromusa ferrireducens sp. nov., psychrophilic, Fe(III)-reducing bacteria isolated from Arctic sediments, Svalbard. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 2006, no. 56 (Pt 5), pp. 1133–1139.
 39. Vodyanitskiy Yu.N., Shelobolina E.S. Biologicheskaya reduktsiya (gidr)oksidov zheleza (III) v pochvakh i rol prirodnogo organicheskogo veshchestva v etom protsesse [Biological reduction of (hydr)oxides of iron (III) in soils and the role of natural organic matter in this process]. *Agrokhimiya*, 2007, no. 8, pp. 87–96.
 40. Tourova T.P., Omelchenko M.V., Fegeding K.V., Vasileva L.V. The phylogenetic position of Methylobacter psychrophilus sp. nov. *Microbiology (Mikrobiologiya)*, 1999, vol. 68, no. 4, pp. 493–495.
 41. Kalyuzhnaya M.G., Beck D.A., Vorobev A., Smalley N., Kunkel D.D., Lidstrom M.E., Chistoserdova L. Novel methylotrophic isolates from lake sediment, description of Methylothermobacter versatilis sp. nov. and emended description of the genus Methylothermobacter. *International journal of systematic and evolutionary microbiology*, 2012, vol. 62, no. 1, pp. 106–111.
 42. Cabrol L., Thalasso F., Gandois L., Sepulveda-Jauregui A., Martinez-Cruz K., Teisserenc R., Tananaev N., Tveit A., Svenning M.M., Barret M. Anaerobic oxidation of methane and associated microbiome in anoxic water of Northwestern Siberian lakes. *Science of the Total Environment*, 2020, vol. 736, 139588.

Received: 18 April 2023.

Reviewed: 23 June 2023.

Information about the authors

Evgeniya A. Soldatova, Cand. Sc., senior researcher, University of Tyumen; junior researcher, Geological Institute RAS.

Evgeniya S. Sidkina, Cand. Sc., leading researcher, Geological Institute RAS.

Bogdan A. Kiriukhin, postgraduate, junior researcher, University of Tyumen.

Prokopy N. Maximov, postgraduate, National Research Tomsk Polytechnic University.

Liudmila A. Krivenok, junior researcher, A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS.

Vladimir Ivanov, postgraduate, research laboratory assistant, University of Tyumen.

Nikita I. Tananaev, Cand. Sc., leading researcher, P.I. Melnikov Permafrost Institute SB RAS; laboratory head, North-Eastern Federal University.

УДК 504.61-536.252

ТРАНСПОРТ ШЛАМА БУРОВЫМ РАСТВОРОМ В ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ СКВАЖИНАХ. ЧАСТЬ 1. МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ДИСПЕРСНЫХ ТЕЧЕНИЙ

Харламов Сергей Николаевич¹,
kharsn@mail.ru

Джанхорбани Мехран¹,
mehran.janghorbani@gmail.com

Зайковский Всеволод Викторович²,
4lk4st@gmail.com

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

¹ Филиал Томского нефтепроводного управления АО «Транснефть – Западная Сибирь»,
Россия, 634050, г. Томск, ул. Набережная р. Ушайки, 24.

Актуальность исследования связана с разработкой технических решений для бурения скважин с горизонтальными окончаниями, при которых очистка кольцевого пространства от частиц пробуренного шлама в условиях гидротранспорта представляется технологически и экономически высокоэффективной по сравнению с другими, например, механическими способами.

Цель: разработка вычислительной методики/подхода к детальному прогнозу и глубокому пониманию физического механизма влияния гидротранспорта на интенсивность очистки скважин. Причем стратегия такого исследования ориентирована на выбор условий течения и реологических параметров модели, при которых полученные подробные теоретические сведения об эволюции динамической структуры потока следует использовать при разработке расчетных методов и формулировке рекомендаций инженерному персоналу для предупреждений аварийных ситуаций.

Объект: новый класс вязких течений дисперсных сред, индуцированных внешними и внутренними силами, характерными для функционирования специального оборудования, обеспечивающего движение бурового раствора со сложной реологией в скважине через эксцентричное кольцевое межтрубное пространство.

Методы исследования соответствуют анализу гидродинамики и массопереноса при сложных сдвиговых течениях гетерогенных сред в пространственных областях с произвольной образующей ствола скважины, а также уяснению физической картины и условий очистки.

Результаты. Данная работа представляет собой первую часть исследований, посвященных решению комплексных проблем, сопровождающих гидротранспорт реологически сложных смесей по скважинам с протяженным горизонтальным участком и их очистке от бурового шлама. В первой части представлены данные по обоснованному моделированию гидродинамики вязкой дисперсной смеси в рамках обращения к полным уравнениям, описывающим законы сохранения массы, импульса для выявления особенностей, установления закономерностей течения в эксцентричной области кольцевого межтрубного пространства, а также поиска путей интенсификации процесса очистки в условиях реального бурения. Предполагается, что вязкостно-инерционно-гравитационное движение жидкости типа Гершеля–Балкли с твердыми частицами (песка) выполняется в условиях развивающегося по пространству ламинарно-турбулентного, прямого и закрученного (методом подвижной стенки) течения. Отмечается, что формирование режимов с активным и консервативным действием внешних и внутренних сил позволяет проводить эффективную очистку межтрубного пространства. Выполнен анализ системы определяющих уравнений математической модели гидродинамики и массопереноса на предмет возможности учета изменений нелинейности теплофизических свойств, устойчивости к возмущениям на границах области течения и раздела фаз. Отмечается, что предсказание молярных процессов проводится в рамках современных статистических моделей RANS-метода и эйлерово-лагранжева подхода к описанию движения гетерогенных сред, реализованного в ПО ANSYS CFD. Показано, что в условиях реального бурения математическая модель успешна по определению спектра локальных и интегральных параметров гидродинамики и массопереноса в широком диапазоне изменений условий бурения, позволяющих уяснить эффекты седиментации частиц на нижнюю стенку, динамику отрыва вихрей и перенос частиц в низкорейнольдсовую область с взвешенным состоянием структуры смеси и инерционную зону ядра потока. Отмечается, что на интенсивность гидротранспорта вниз по потоку заметное влияние оказывают условия входа фаз, реологические характеристики раствора. Расчетами установлены области течения с удовлетворительным согласием динамических характеристик течения по предлагаемой модели с имеющимися опытными данными, например, напряжению трения, радиальным распределением компонент вектора скорости раствора по длине скважины при различных углах отклонения ее ствола от вертикали. Более того, результаты настоящей работы следует учитывать при изложении материала второй части как дополнения к исследованию гидротранспорта по предложенной методике реального бурения горизонтальных скважин при оптимальных реологических свойствах раствора.

Ключевые слова:

скважина, горизонтальный участок, эксцентричность, бурение, моделирование, гидродинамика, реология, шлам, очистка.

Введение

Трудности очистки скважин с протяженными горизонтальными участками большей частью связаны с

отсутствием информации об особенностях пространственных процессов переноса массы, импульса и теплоты, формирующих скорости бурения, течения промывочной жидкости, изменений рео-, физико-

химических и механических свойств смеси (шлама и жидкости) в технологическом процессе. Накопление бурового шлама в донной части межтрубного пространства ведёт к ряду серьёзных технических проблем. Поэтому безаварийное бурение вынуждает персонал часто останавливать процесс и осуществлять очистку скважины. Эти трудоемкие и достаточно длительные операции могут занимать несколько суток. Поэтому крайне важно иметь результаты с детальным решением задачи очистки скважины при самом бурении и подробное описание условий, способствующих экстенсификации процесса накопления шлама. Однако уяснение особенностей и установление закономерностей движения твердых частиц через межтрубное эксцентричное пространство, образованное бурильной колонной и стенками скважины в разнообразных режимах, довольно сложны и возможны только в рамках комплексного физико-математического и численного моделирования с привлечением моделей и методов механики гетерогенных сплошных сред. Эти модели составляют основное содержание специальных программных комплексов, представленных, например, в ПК ANSYS CFD, и вполне успешно способны исследовать рассматриваемые проблемы [1, 2].

Учитывая сказанное, в настоящей работе поставлены следующие цели – разработать численную методику для всестороннего анализа физического механизма влияния гидротранспорта на интенсивность очистки скважин в реальных условиях бурения, привлекая современные математические модели гидродинамики, реализованные в ANSYS CFD (Computational Fluid Dynamics); оценить возможности методики для точного и детального прогноза взаимосвязанных эффектов молекулярного и молярного процессов переноса массы и импульса в реологически сложных гетерогенных средах при бурении; выдать практические рекомендации инженерам-нефтяникам по оптимальным подходам к моделированию бурения, способствующим повышению качества очистки горизонтальных стволов скважин.

Библиографические данные по проблеме моделирования транспорта шлама и очистки скважин

Важно подчеркнуть, что с тех пор, как Х. Бильгесу с соавт. [3] обратились к использованию эйлерового подхода для моделирования процесса накопления и очистки от шлама стволов скважин ряд исследователей повторили эту попытку. Было установлено, что данный подход весьма эффективен при анализе процессов, реализованных на небольших лабораторных установках в довольно широком диапазоне их функционирования. Здесь следует отметить результаты следующих авторов: С. Хан с соавт. [4] и С. Хяофенг с соавт. [5] изучали эффект вращения внутренней трубы вдоль своей собственной оси; Р. Руки с соавт. [6] применили этот подход для промысловых жидкостей на основе пены; Т. Офей с соавт. [7] исследовали влияние разных параметров на процесс очистки; М. Камяб с соавт. [8] моделировали процесс бурения с колонной гибких труб; С. Снеха с соавт. [9] выполнили расчеты и привели оценки эффективности

очистки при использовании буровых растворов на основе воды и углеводорода; О. Хейдари с соавт. [10], в отличие от других исследователей, предпочитавших расчет структуры течения жидкой фазы по $k-\varepsilon/k-\omega$ моделям турбулентности, применили более сложную и «гибкую» модель турбулентности для рейнольдсовых напряжений; Б. Панг с соавт. [11] использовали реологическую модель Гершеля–Балкли для описания свойств неньютоновской жидкости, которая хорошо соответствует изменению реологии большинства буровых растворов. К этому времени эйлеровский подход был достаточно обоснован и верифицирован в жидкостно-жидкостных средах и адаптирован в исследованиях течений дисперсных систем с частицами твердой фазы. Причем особенности смесей описывались в рамках моделей, основанных на положениях кинетической теории гранулярного строения. В этом направлении выделяются исследования, выполненные по моделям Д. Гидаспоу [12] и М. Сиамлал, Т. Обриен [13]. Заметим, что другие авторы моделировали процесс очистки с помощью лагранжева подхода, который позволяет рассчитать траекторию и местоположение разных частиц твердой фазы. Этот подход значительно требовательнее с точки зрения вычислительных ресурсов, но даёт более полную картину процесса. Первыми применили его У. Мме с соавт. [14], которые также изучили эффекты влияния геометрической формы частиц на их транспорт. Эти исследования были продолжены Э. Епелле с соавт. [15], которые также отметили, что различия расчетов между этими подходами незначительные. С. Ахшик с соавт. [16] использовали оба подхода для моделирования гидродинамики трёхфазной смеси и доказали, что подходы и методы вычислительной гидродинамики в рамках ПК ANSYS CFD способны давать надёжные результаты. В целом сравнения с экспериментальными данными, полученные этими авторами, позволяют утверждать, что результаты моделирования локальных и интегральных процессов отличаются от реальных в пределах 1...12 %, например, по концентрации шлама и перепаду поля давления. Однако важно отметить, что все указанные авторы использовали режим стационарного течения при моделировании гидродинамики смеси, в то время как хорошо известно, что процесс накопления шлама является по сути неустановившимся и по мере накопления шлама поле скорости жидкой фазы существенно меняется по пространству. Все эти особенности способны активно влиять на процесс седиментации частиц. В силу сказанного, в данной статье обосновывается оригинальная математическая модель для прогноза гидротранспорта смеси бурового раствора с частицами шлама в скважинах, основанная на эйлери-лагранжевом подходе для описания развивающегося по пространству сложного сдвигового течения в условиях прямоочного и закрученного движений с привлечением алгоритма (strong coupling), учитывающего детали внутри- и межфазного взаимодействия между капельной жидкостью и твердыми частицами.

Физические допущения к построению модели внутреннего течения реологически сложной смеси

В настоящем исследовании рассматривается сценарий течения гетерогенной среды, включающей буровой раствор с частицами продуктов выработки породы, в режиме, отличающемся следующими особенностями, характерными для условий реального бурения. Так, предполагается, что движение капельной жидкости соответствует условиям развивающегося (по межтрубному эксцентричному пространству и стационарному по времени ламинарного или турбулентного) течения, которое осложнено нелинейностью теплофизических и морфологических свойств смеси, а также переменным во времени вводом частиц продуктов выработки во входном сечении скважины. Данное условие отвечает учету особенностей технологического процесса бурения и функционирующего оборудования, в частности, таких параметров, как скорости бурения, площади и диаметра долота, объема и плотности частиц, состава и строения породы. Принимается, что в качестве несущей среды выступают обычные буровые растворы с реологическими свойствами неньютоновской капельной жидкости. Учитывается, что течение осложнено эффектами седиментации частиц бурового шлама в нижней части межтрубного пространства. Осаждение частиц формирует слой, размеры которого много меньше поперечного сечения межтрубного пространства, но очень чувствительны к изменению крутящего момента буровой колонны. Это интенсифицирует процессы взаимодействия узлов оборудования с загромождением сечения частицами твердой фазы и вызывает неблагоприятные эффекты заклинивания и прихвата труб. Морфологию бурового раствора определяет модель жидкости Гершеля–Балкли. Плотность частиц шлама много больше плотности диспергированной составляющей смеси. Более того, принимается, что частицы бурового шлама сферичны по форме, инертны, их доля в смеси определяется порядком $\alpha_p < O(10^1)$, а эффект от их соударений друг с другом пренебрежимо мал. Предполагаем, что проточный режим пространственного изотермического несжимаемого течения капельной жидкости вязкостно-инерционно-гравитационный, стационарный по условиям входа в скважину, осложненный нестационарными эффектами загрузки твердых частиц на входе в скважину. Распределение загрузки монодисперсных частиц соответствует однородному профилю постоянной интенсивности за единицу времени рабочего процесса. При указанных условиях представляется важным: численно исследовать особенности изменений структуры потока; уяснить закономерности определения критических (минимально рекомендуемых) динамических параметров шлама по скважине; получить сведения об оптимальных/безаварийных условиях функционирования оборудования при бурении.

Формулировка математической модели процесса гидротранспорта смеси

Поскольку рассматриваемый процесс бурения сопровождается нестационарным характером простран-

ственного вязкостно-инерционно-гравитационного реологически сложного движения смеси по эксцентричным трубам с горизонтальной и наклонной ориентацией, определяющими уравнениями математической модели гидродинамики выступают законы сохранения массы (1), импульса (2), которые для условий несжимаемости вместе с соответствующими замыканиями (3), (4) имеют вид [17–21]:

$$\frac{\partial(\alpha\rho_f)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha\rho_f \mathbf{v}_f) = 0; \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\alpha\rho_f \mathbf{v}_f)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha\rho_f \mathbf{v}_f \mathbf{v}_f) = -\alpha \nabla p + \nabla \cdot (\alpha \boldsymbol{\tau}^s) + \mathbf{S}_f + \alpha\rho_f \mathbf{g}; \quad (2)$$

$$\boldsymbol{\tau}^s = \boldsymbol{\tau}_L + \boldsymbol{\tau}_T, \quad \boldsymbol{\tau}_L = 2\mu\dot{\mathbf{S}} - \frac{2}{3}(\mu\nabla \cdot \mathbf{v}_f)\mathbf{I},$$

$$\dot{\mathbf{S}} = 0,5[\nabla \mathbf{v}_f + (\nabla \mathbf{v}_f)^T], \quad \mathbf{S}_f = \sum_{i=1}^2 \mathbf{F}_{f,i} / V; \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^2 \mathbf{F}_{f,i} = \mathbf{F}_a + \mathbf{F}_D, \quad \mathbf{F}_a = -\frac{1}{6}\pi d^3 \rho_f \mathbf{g}. \quad (4)$$

В записи уравнений (1)–(4) принимается: α – объемная доля жидкой фазы; в источниковом члене $\mathbf{S}_f$ доминируют силы, ответственные за эффекты плавучести и сопротивления ($\mathbf{F}_a, \mathbf{F}_D$) соответственно. Описание реофизических свойств вязкой среды проводится в рамках соотношений кинетической теории гетерофазного гранулярного течения. Причем при определении индивидуальных компонент тензора вязких напряжений используется RANS-подход статистической теории турбулентности [1–6], где $\boldsymbol{\tau}^s$ – тензор эффективных напряжений в смеси – представляет собой суперпозицию соответствующих параметров при ламинарном (L) и турбулентном (T) процессах переноса импульса жидкой фазы (3). Более того, допускаем, что молярные процессы описываются соотношением Буссинеска в виде (5):

$$\boldsymbol{\tau}_T = 2\mu_t \left[\dot{\mathbf{S}} - \frac{1}{3} k \cdot \mathbf{I} \right], \quad (5)$$

где $k = \frac{\bar{\rho}_f \overline{u'_f u'_f}}{2}$, $i = \overline{1,3}$ – кинетическая энергия турбулентности; $\dot{\mathbf{S}}, \mathbf{I}$ – тензоры скоростей деформаций жидкой фазы и единичный тензор актуальных (или осредненных по Рейнольдсу при анализе турбулентных режимов течения смеси) величин соответственно.

В рамках модели течения неньютоновской жидкости типа Гершеля–Балкли [22] эффективную вязкость μ в (3) определяем в виде (6):

$$\left\{ \begin{array}{l} \mu = \mu_{\text{пред}}, \quad \dot{\mathbf{S}} < \frac{\tau_0}{\mu_{\text{пред}}} \\ \mu = \frac{\tau_0 + \kappa[\dot{\mathbf{S}}^n - (\tau_0 / \mu_{\text{пред}})^n]}{\dot{\mathbf{S}}}, \quad \dot{\mathbf{S}} \geq \frac{\tau_0}{\mu_{\text{пред}}} \end{array} \right. \quad (6)$$

Добавим, что в модели принято, например, для несжимаемого течения смеси: $\mu = \mu(I_2)$,

$$I_2 = (\dot{\mathbf{S}}; \dot{\mathbf{S}}) = \sum_{i,j=1}^3 \dot{S}_{ij} \dot{S}_{ji},$$

где I_2 – второй инвариант тензора скоростей деформаций. Тогда эффективную вязкость неньютоновской среды можно представить в виде функциональной связи типа $\mu = \mu(\dot{\mathbf{S}}; \dot{\mathbf{S}})$ или $\mu = \mu(\boldsymbol{\tau}; \boldsymbol{\tau})$, где в рамках (6) принято: $\dot{S}^2 = 0,5(\dot{\mathbf{S}}; \dot{\mathbf{S}})$, $\tau_0^2 = 0,5(\boldsymbol{\tau}; \boldsymbol{\tau})$. Хорошо известно [1, 2, 23–25], что в рамках квази- и анизотропных течений турбулентные характеристики смешанного течения (μ_t) вполне корректно предсказываются по однофазной версии модели рейнольдсовых напряжений $RSS-k\omega/kL$, где опорной базой выступает двухпараметрические $k\omega$ - SST -, kL -модели, оригинальный вид которых представлен в [26–29]. Тогда, следуя идеям [23–26, 29, 30], рассматриваемые сложные сдвиговые течения можно успешно рассчитывать по многопараметрическим моделям RANS метода – моделям рейнольдсовых напряжений RSS -модели (7) с опорной двухпараметрической гидродинамической ($k\omega$ - SST , kL) базой (8). Общий вид таких моделей, согласно [23, 24, 29], следующий:

$$C_{ij} = D_{ij} + P_{ij} + R_{ij} + \varepsilon_{ij}; \quad (7)$$

$$C_r = D_r + P_r + \varepsilon_r. \quad (8)$$

Здесь индексы « i, j » ($i, j = \overline{1, 3}$) отвечают, соответственно, напряжениям Рейнольдса ($\overline{u'_i u'_j}$); « r » – формальный параметр конкретного диссипативного уравнения опорной базы, определяющий обращение к дифференциальному уравнению переноса, например, для ω , ε или L . Другие символы характеризуют механизмы переноса напряжений $\overline{u'_i u'_j}$ (и признака r) вследствие конвекции (C), диффузии (D), порождения (P), перераспределения (R), диссипации (ε), детальную запись которых можно найти, например, в [29].

При выборе модели турбулентности в расчетах процессов в капельной среде следует учитывать, что в рамках принятых выше физических допущений, учитывающих особенности геометрической и гидродинамической конфигурации задачи, состав гетерофазной системы, значения объемной доли дисперсной фазы (до 10 %), течение рассматриваемой смеси будет отличаться анизотропными эффектами. Поэтому для выявления особенностей потока расчеты целесообразно выполнять по RSS -моделям турбулентности (в рамках ПК ANSYS CFD) с опорными k -, ω -, ε -, L -базами. Последние требуют модификаций на учет механизмов движения двухфазной среды, например, за счет уноса твердых частиц бурового шлама (как частиц пассивной примеси) вязкой жидкостью вследствие работы сил межфазного взаимодействия,

В настоящей работе моделирование и расчет состава смеси проводится в рамках положений Эйлера-Лагранжева (Л) подхода, в котором эффект внешних сил определяется комплексным влиянием *силы межфазного взаимодействия*. Причем в ней доминирует сила сопротивления $\mathbf{F}_D$. Также допускается [30–33], что выталкивающей силой можно прене-

бречь при малых значениях объемной доли частиц α_p . Тогда эволюцию динамической структуры и траектории частиц в кольцевом пространстве можно рассчитать по (9) с замыкающими связями типа (10), (11):

$$m_p \frac{\partial \mathbf{v}_p}{\partial t} = \mathbf{F}_v + \mathbf{F}_D + \mathbf{F}_{pres} + \mathbf{F}; \quad (9)$$

$$\mathbf{F}_v = (\rho_p - \rho_f) \mathbf{g} V_p, \quad \mathbf{F}_{pres} = -V_p \nabla p,$$

$$\mathbf{F}_D = \frac{c_d \rho_f A_p}{2} |\mathbf{v}_f - \mathbf{v}_p| (\mathbf{v}_f - \mathbf{v}_p); \quad (10)$$

$$c_d = a_1 + \frac{a_2}{Re} + \frac{a_3}{Re}, \quad Re = \frac{\rho_f d_p |\mathbf{v}_f - \mathbf{v}_p|}{\mu_f},$$

$$A_p = \frac{\pi d_p^2}{4}, \quad V_p = \frac{1}{6} \pi d_p^3. \quad (11)$$

В соотношениях (9)–(11) индексы « p, f » описывают твердые частицы и жидкость соответственно; $\mathbf{F}_D$ – сила гидродинамического сопротивления; $\mathbf{F}_{тяж}$ – сила тяжести, входящая в формулировку выталкивающей силы $\mathbf{F}_v$ (10). Заметим, что для общности условий математической постановки задачи в (9) $\mathbf{F}$ можно рассматривать как параметр, отвечающий за влияние сил Саффмэна/Магнуса, которыми здесь обоснованно пренебрегается; A_p , V_p – площадь и объем частицы соответственно.

Краевые условия задачи

Для численного интегрирования определяющих уравнений математической модели (1)–(11) используются следующие условия. Так, *геометрическую часть* формируют соотношения пространства: продольная длина (L), ширина и смещение (b) центра ядра относительно продольной оси внешней трубы. *Динамическая часть* содержит условия для задания: скорости потока на входе (U_0), интенсивности турбулентности (Tu), локальных свойств вихря – кинетической энергии (k) и скорости диссипации (ε) турбулентности, масштаба (L) энергосодержащих вихрей и т. п. *Диффузионная часть* отвечает заданию состава (α_i) входящей смеси. *Теплофизическая часть* связана с заданием физических свойств смеси: плотности несущей среды, материала частиц и их объемной доли α_p ; $\mu_f = \mu_f^0$, $\lambda_f = \lambda_f^0$ – динамической вязкости и теплопроводности жидкости соответственно; а также других структурных величин, характеризующих рассматриваемую смесь. *Начальные условия* для твердых частиц соответствуют заданию их распределений на входе в скважину за единицу времени с учетом условий рабочего процесса бурения в виде: $N_i(t) = N_i^0 + [(t-t_0)/\Delta t] * C$, здесь C – величина ввода i -й частицы за сек, $[c^{-1}]$, где $C = RS_d/V_p$, R – скорость бурения, S_d – площадь долота, V_p – объем частицы, N_i^0 – распределение i -й частицы в начальный момент времени. *Граничные условия* отвечают случаю изотермического течения и описывают параметры: на входе дисперсной смеси соответственно для Γ_1 , внешней границе кольцевой зоны для Γ_2 , стенке внутренней трубы Γ_3 , выходе Γ_4 . Так, на Γ_1 – однородные профили фаз (известные для процесса) по поперечному сечению, причем фазы находятся

в равновесии. На Γ_4 – условия непрерывности течения. На стенках (Γ_2, Γ_3) для несущей фазы принимаются условия прилипания для всех осредненных и пульсационных характеристик капельной жидкости; для твердых частиц – условия проскальзывания.

Детали численного решения

Геометрическая конфигурация горизонтального участка скважины представляет собой кольцевой канал с соосным расположением труб с параметрами: $D=20$ см, $d=12$ см – внешний и внутренний диаметры труб, что соответствует обычным размерам долот и буровых труб в России и за рубежом для горизонтальных участков; длина скважины $L=6...10$ м отвечает протяженности порядка $(60...80)D_{гд}$ с целью исключения влияния на течение возмущений со входа, где $D_{гд}$ – гидравлический диаметр; эксцентricность $e=(75...85)\%$, что также характерно для горизонтальных участков и условий, когда буровая труба лежит на своих муфтах на нижней стенке скважины (рис. 1).

Заметим, что для негоризонтальных секций с произвольным углом наклонности задание эксцентricитета невозможно. Это связано с тем, что данный параметр существенно зависит от геометрии скважин и буровой колонны. Но, учитывая, что в идеале трубы должны быть расположены почти концентрично, то моделирование было выполнено при указанных выше значениях.

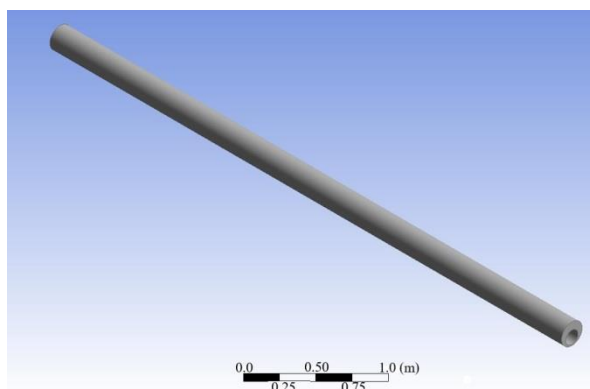


Рис. 1. Геометрия скважины с эксцентricной буровой трубой

Fig. 1. Geometry of a well with eccentric drill pipe

Наши предварительные исследования по выяснению вида оптимальной разностной сетки для анализа особенностей гидродинамики дисперсного потока показали, что с точки зрения затрат на реализацию алгоритма, получения численного решения соответствующих уравнений математической модели и точности прогноза изменений локальных и интегральных параметров течения, массопереноса в смеси в особых зонах течения можно считать подходящей сетку с общим числом восьмиугольных ячеек порядка: 325.000 – для горизонтальных участков и 305.600 ячеек – для всех остальных случаев. Заметим, что на таких сетках погрешность расчета локальных значений полей скоростей при увеличении числа ячеек не

превысила 2 %. Вид такой разностной сетки показан на рис. 2.

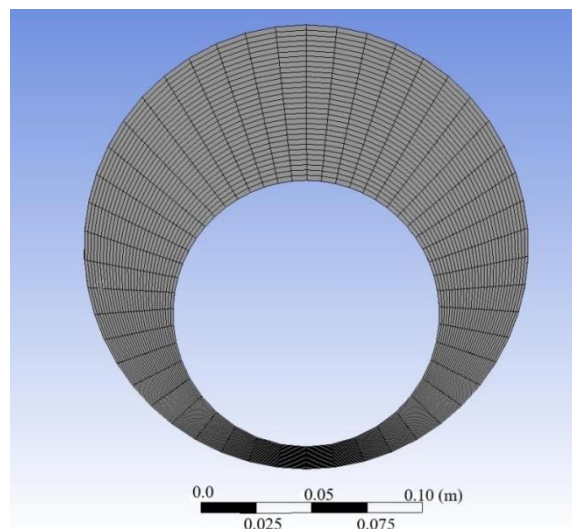


Рис. 2. Разностная сетка в поперечном сечении межтрубного пространства

Fig. 2. Difference mesh in the shell side cross-section

При построении численного решения уравнений (1)–(11), описывающих гидродинамику и массоперенос в смеси, используется алгоритм, отвечающий за реализацию блоков: 1) конечно-разностную аппроксимацию дифференциальных уравнений, сводящую уравнения к соответствующему дискретному аналогу; 2) построение системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) с искомыми величинами для динамической и диффузионной задачи в узловых точках расчетной сетки; 3) решение СЛАУ итерационным методом. Эти вопросы детально изложены, например, в [1, 2, 23–25, 29]. Для достижения требуемой точности интегрирования уравнений вводится критерий погрешности между решениями, получаемыми на двух последних итерациях ($m, m+1$), для соответствующих пространственных изменений искомых локальных параметров ($\Phi = \{\mathbf{v}_f, \mathbf{v}_p, \overline{v_i v_j}, k, \varepsilon, \omega, L\}$) и их интегральных значений (например, $\Phi_{wf} = \tau_{wf}$ – сопротивление трения), отвечающих виду (12):

$$\max_{i,j,k} \left\{ \frac{|\Phi_{i,j,k}^{m+1} - \Phi_{i,j,k}^m|}{\Phi_{i,j,k}^{m+1}} \right\} \leq \Delta_\Phi, \quad \Delta_\Phi = O(10^{-3}), \quad \%. \quad (12)$$

При определении поля давления используется стандартная процедура PISO (расширение алгоритма SIMPLE [21, 34]), а также алгоритм Strong Coupling, ПО ANSYS CFD [21], учитывающий детали внутри- и межфазного взаимовлияния между частицами капельной жидкости и твердыми частицами.

Важные замечания по валидации модели, верификации численного алгоритма и работоспособности методики расчета задач гидротранспорта

Хорошо известно [1, 2, 11, 15, 16], что большинство современных буровых растворов являются неньютоновскими жидкостями. Заметим, что при обобщении

результатов расчетов практических режимов бурения для смесей с ньютоновской и неньютоновской реологией весьма важно установить диапазон изменений определяющих критериев задачи гидротранспорта. В нашем случае для формулировки критериев Бингама, Рейнольдса имеем соотношения типа (13)–(16) в форме, рекомендованной А. Буше [35], Г. Лию [36]:

$$Bi_{HB} = \left(\frac{\tau_0}{k} \right) \left(\frac{d_p}{|v_f - v_p|} \right); \quad (13)$$

$$Re = \frac{4(2n+1)}{n} \times \left[\frac{7,48 \rho v^{2-n} \left(\frac{d_2 - d_1}{24} \right)^n}{\tau_0 \left(\frac{d_2 - d_1}{24v} \right)^n + 0,0021k \left(\frac{2(2n+1)}{nc_a} \right)^n} \right]; \quad (14)$$

$$c_a = 1 - \left(\frac{1}{n+1} \right) \times \frac{\tau_0}{\tau_0 + 0,0021k \left\{ \frac{0,0044q(2n+1)}{n\pi \left[\frac{d_2}{24} - \frac{d_1}{24} \right] \left[\left(\frac{d_2}{24} \right)^2 - \left(\frac{d_1}{24} \right)^2 \right]} \right\}}; \quad (15)$$

$$Re_c = \left[\frac{8(2n+1)}{ny} \right]^{\frac{1}{1-z}}, \quad y = \frac{\log n + 3,93}{50}, \quad z = \frac{1,75 - \log n}{7}. \quad (16)$$

Заметим, что в связях (14)–(16) величины отвечают системе единиц изменений США, т. е. v – скорость, [фут/с]; ρ – плотность [фунт/галлон]; q – дебит [галлон/мин]; k – индекс консистенции [сантипуаза]; τ_0 – предел текучести [фунт/100 фут²]. В частности, ньютоновская жидкость имела изменение динамической вязкости в диапазоне 1–40 сПз. Такие значения соответствуют «кажущимся» вязкостям большинства растворов, используемым при бурении. Причина этого решения заключается в том, что для описания поведения буровых жидкостей существует ряд реологических моделей, три из которых широко используются (модель Бингама, степенного закона и Гершеля–Балкли). Каждая из этих моделей имеет свои индивидуальные параметры, которые не связаны друг с другом. Единственный способ связать их через формулировку кажущейся вязкости, подобно (6). Плотность буровых растворов имеет широкий диапазон, но для выполнения сравнений и выявления особенностей изменений гидродинамики растворов была принята плотность, подобная значению плотности пресной воды (1000 кг/м³).

Здесь отметим, что для проведения расчетов с оптимальными реофизическими свойствами (эти данные представляются в части 2 исследования указанной в настоящей работе проблемы моделирования гидротранспорта с учетом особенностей ее детально-

го анализа [37–42]) допускается, что твердую фазу определяют одноразмерные шарообразные частицы песка с плотностью $\rho_p = 2650$ кг/м³, диаметром $d_p = 6$ мм. Считается, что в области входа реальные скорости частиц равны нулю. Скорость бурения породы – $R = 10 \dots 12$ м/ч. Число частиц, загружаемых в эксцентричное пространство для случая горизонтального участка скважины, соответствует величине порядка 825...850, для всех остальных геометрических конфигураций – 800...820, что в рамках принятых значений их плотности и диаметра соответствует массе порядка 1,98 и 1,92 кг соответственно. Заметим, что такие значения частиц и их общей массы эквивалентны буровой выработке 0,024 и 0,023 м горной породы с доломом диаметра 20 см. Кроме того, принимается, что пористость породы равна нулю. И это считается наихудшей ситуацией с точки зрения очистки скважин. В расчетах (часть 2) моделируются процессы поступления раствора в скважину со скоростями входа: 1 м/с (или 320 гал/мин для данной геометрии); 1,5 м/с (480 гал/мин); 2 м/с (640 гал/мин); 2,5 м/с (800 гал/мин) и 3 м/с (960 гал/мин). Такие значения весьма характерны для бурения и с учетом задания вязкостей и морфологии раствора соответствуют режимам течения смеси при числах Рейнольдса в диапазоне $Re = 2000 \dots 240000$. Кроме того, учитывается, что углы отклонения ствола скважины от вертикали соответствуют значениям: 0°; 15°; 30°; 45°; 60°; 75° и 90°. Гидродинамическая конфигурация соответствует условиям прямоочного течения. Вращение труб не рассматривается, чтобы прогнозировать самые худшие случаи с точки зрения очистки скважин. Заметим, что данные условия встречаются при слайдинге, когда долото вращается только с помощью забойного двигателя для изменения угла наклона ствола.

Подчеркнем, что представленные в настоящей работе результаты (как сведения части 1 по фундаментальным особенностям формулировки вычисленной методики и алгоритма решения задачи гидротранспорта) демонстрируют суть численной реализации математической модели (1)–(11) с целью получения ее устойчивого решения, которое строится по алгоритму с отработкой следующих блоков. Так, первоначально рассчитывается течение жидкой фазы с привлечением блока Coupled, затем блок определения динамики частиц твердой фазы с выполнением глобальных итераций для линеаризации эффектов в расчетах фаз, обусловленных переменностью физических свойств и конвективно-диффузионными внутри- и межфазными процессами. В таком алгоритме устойчивость численного решения достигалась после 800...900 глобальных итераций на каждом временном слое. Причем погрешности расчета определяющих параметров модели принимают значения меньше 10^{-5} при обращении к ПО ANSYS FLUENT 2021 R1. Отметим, что в данной методике контроль за эффективностью процесса очистки следует проводить по параметру, ответственному за время, в течение которого все частицы проходят рассматриваемую геометрию и выходят из ствола скважины. С практической точки зрения анализ этого параметра важен для оптимиза-

ции очистки скважин, выдачи рекомендаций инженерному персоналу для уменьшения его значений. Также следует учитывать, что для практики важны сценарии уменьшения параметра, ответственного за время пребывания частиц при прохождении межтрубного пространства. Так, если при транспортировке смеси возникают процессы, при которых время пребывания частиц в межтрубном пространстве меньше или равно времени течения жидкой фазы (например, составляющим для рассмотренных скоростей течения значения 6, 4, 3, 2,4 и 2 с), тогда частицы пробуренной породы выносятся раствором из геометрии. Однако если с течением времени возникают режимы движения частиц, при которых это время превосходит время течения жидкой фазы, следует ожидать, что частицы будут накапливаться в донной части, причем тем интенсивнее, чем больше будет величина времени их пребывания в кольцевом канале. Такая ситуация требует оперативной остановки процесса бурения и проведения более частых операций по удалению загрязнений и очистке скважин от шлама.

Для глубокого анализа особенностей указанных течений важно детально анализировать и прогнозировать структурные изменения, сопровождающие транспорт рабочей смеси в особых областях рассматриваемого внутреннего течения в технологическом процессе бурения. А как отмечалось выше (стр. 5, физические допущения), этот процесс отличается сложными конвективно-диффузионными механизмами переноса импульса, массы в растворе. Поэтому чрезвычайно важно для инженера-исследователя иметь надежные данные о работоспособности модели, алгоритма, особенно при прогнозе динамики вихревых образований, интенсивности турбулентных пульсаций и их корреляций в рассматриваемых условиях течения, и прежде всего в низкорейнольдсовых областях течения – вблизи границ взаимодействия фаз и в окрестности поверхностей труб. Эти обстоятельства определяют необходимость моделирования процессов молярного переноса импульса в смеси с привлечением современных статистических моделей турбулентности второго порядка с транспортными дифференциальными уравнениями для напряжений Рейнольдса (RSS – Reynolds Shear Stresses) и двухпараметрической динамической опорной базой из дифференциальных уравнений для кинетической энергии турбулентности (k) и завихренности (ω) (например, уравнения RSS- $k\omega$ модели (7), (8) в рамках анализа данных [23–26, 29, 30]). Нами установлено, что эти модели позволяют иметь более точные распределения осредненных и пульсационных гидродинамических величин в кольцевом пространстве скважины, а также способны проникнуть в суть особенностей изменений неоднородной анизотропной структуры потока. Более того, на их основе возможно обоснованное совершенствование популярных в приложениях полуэмпирических методик, используемых в решении задач гидротранспорта и очистки скважин.

С учетом сказанного, преимущества RSS-моделей [23–29] и возможности методики в решении задач гидротранспорта демонстрируют данные на рис. 3–12.

Это результаты численного расчета изменений динамической структуры капельной жидкости (с частицами песка) в условиях устойчивого турбулентного ($Re=(6...8) \cdot 10^3$) прямого ($\Omega=0$ об/мин, рис. 3–6, 11) и закрученного (методом подвижной стенки, $\Omega=10...30$ об/мин, рис. 7–10, 12) течений дисперсной смеси в коаксиальной и эксцентричной области межтрубного пространства скважины. Заметим также, что расчеты отвечают изменению параметров в выходном сечении скважины с общей длиной $L=12$ м, внешним и внутренним диаметрами соответственно $D=0,20$ м, $d=0,12$ м, и эксцентricностью $e=70\%$ и соответствуют условиям полностью установившегося изотермического турбулентного течения смеси с данными на входе: $U_0=1$ м/с, $Tu=10\%$, $\mu=1$ сПз, $Re=8 \cdot 10^3$. Причем эффект наложения крутки ($\Omega=30$ об/мин), осложняющий течение смеси вдоль оси скважины, иллюстрирует картины радиального распределения локальных осредненных и пульсационных гидродинамических параметров, представленные на рис. 7–10, 12.

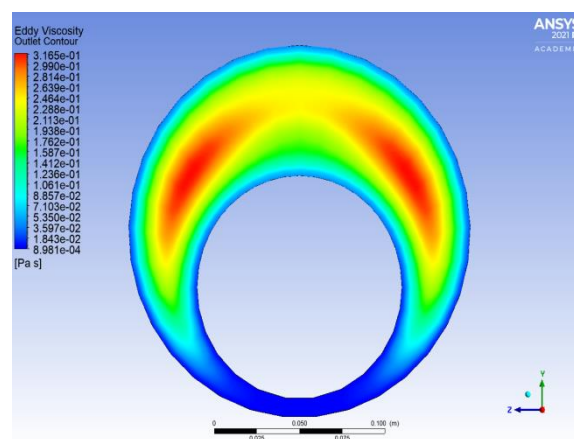


Рис. 3. Турбулентная вязкость при прямооточном течении

Fig. 3. Turbulent viscosity at the straight-through flow

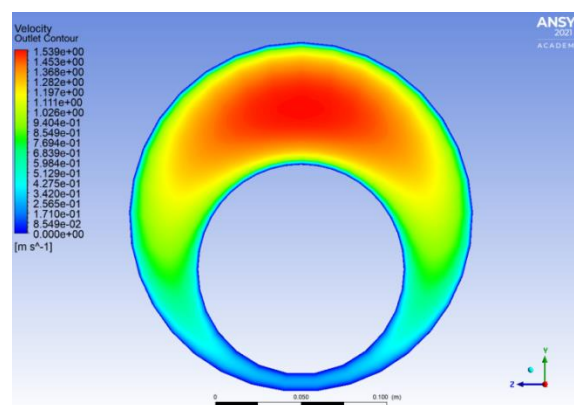


Рис. 4. Осевая компонента вектора скорости при прямооточном течении

Fig. 4. Velocity vector axial component at the straight-through flow

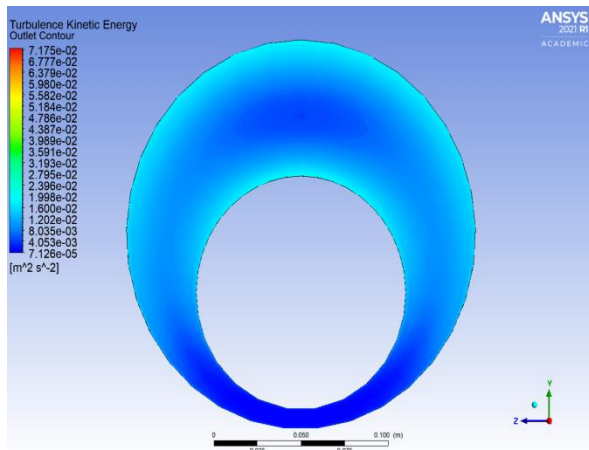


Рис. 5. Турбулентная кинетическая энергия при прямо-точном течении

Fig. 5. Turbulent kinetic energy

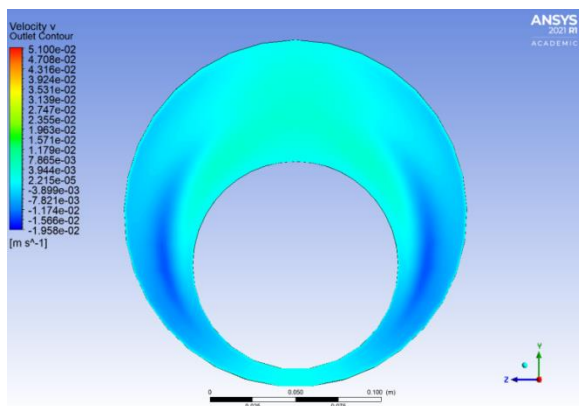


Рис. 6. Радиальная компонента вектора скорости при прямоточном течении

Fig. 6. Radial component of velocity vector

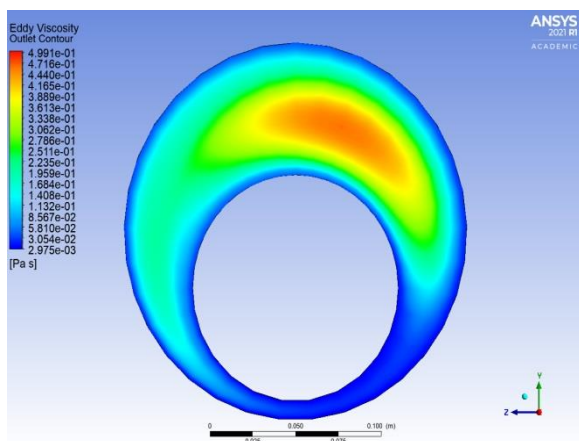


Рис. 7. Турбулентная вязкость при закрученном тече-нии

Fig. 7. Turbulent viscosity at the swirling flow

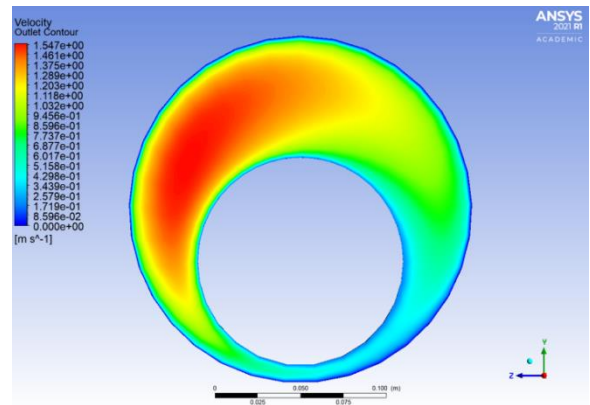


Рис. 8. Осева компонента вектора скорости при за-крученном течении

Fig. 8. Velocity vector axial component at the swirling flow

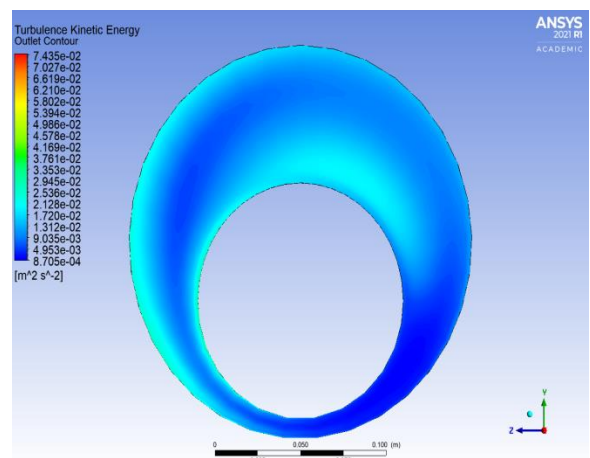


Рис. 9. Турбулентная кинетическая энергия при закру-ченном течении

Fig. 9. Turbulent kinetic energy at the swirling flow

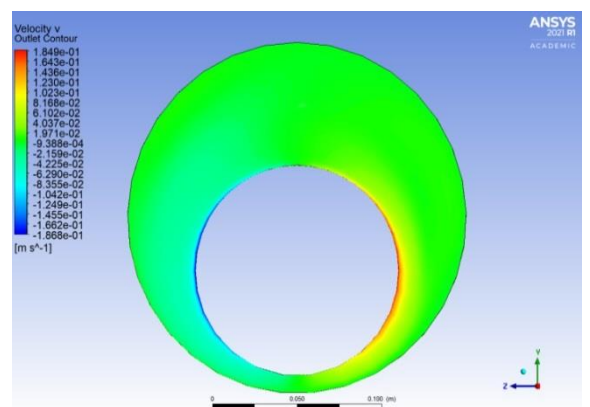


Рис. 10. Радиальная компонента вектора скорости при закрученном течении

Fig. 10. Radial component of velocity vector at the swirling flow

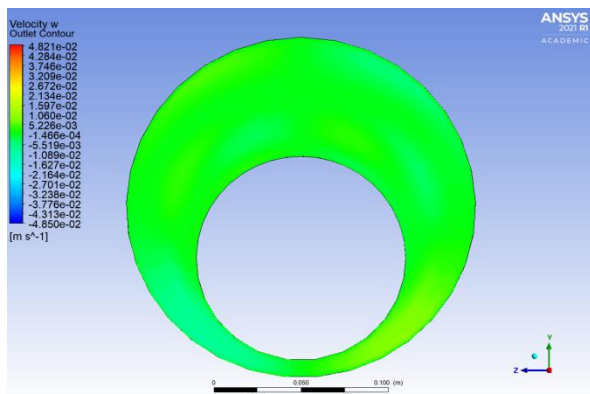


Рис. 11. Тангенциальная компонента вектора скорости (прямоточный поток $\Omega=0$)

Fig. 11. Tangential component of velocity vector (straight-through flow $\Omega=0$ rpm)

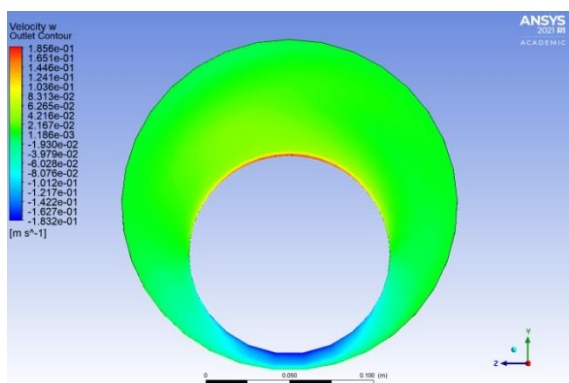


Рис. 12. Тангенциальная компонента вектора скорости (закрученный поток $\Omega=30$ об/мин)

Fig. 12. Velocity vector tangential component (swirling flow $\Omega=30$ rpm)

Анализируя особенности закрученного турбулентного течения, стоит отметить, что подобные режимы интересны для приложений, т. к. сопряжены с возможностью подавления турбулентности круткой и формированием условий для ламинаризации потока. Наши данные моделирования сложных сдвиговых течений в кольцевой области показывают (например, [29, 30]), что интенсивное вращение внутренней стенки приведет к структуре потока, в котором наблюдаются большие значения радиальных градиентов компонент вектора скорости, способные вносить возмущения в «постельный» слой шлама (в окрестности нижней стенки) и интенсифицировать процесс выноса твердых частиц из скважины, что ценно для очистки оборудования.

В целом анализ параметров, определяющих эволюцию структуры прямоточного потока в кольцевой области, указывает на существование особенностей в изменении поля скорости. Видно, что картины радиальных изменений молекулярной, молярной и эффективной вязкостей смеси неоднозначны из-за особенностей переноса импульса осредненного и пульсационного движения, направленных как на усиление возмущений течения в ядре потока, так и на их ослабление (при пассивной роли эффекта в демпфировании

турбулентности вязким пристеночным слоем). Также важно подчеркнуть, что кинетическая энергия турбулентности (рис. 5) проходит через все стадии преобразования по сечению кольцевого канала. Расчеты констатируют, что имеют место следующие физические эффекты, определяющие механизмы распределений параметров в радиальной плоскости по характеру изменений компонент вектора скорости (рис. 4, 6, 11): *выделение* турбулентной энергии из основного течения; *диффузия*; *конвективный* перенос; *вязкая* диссипация. Оцифровка высоких значений в исследуемых величинах (U_i , $i=1-3$; k , μ_t) подчеркивает не только роль размеров областей с интенсификацией конвективно-диффузионного переноса, но и способность потока к удержанию частиц от седиментации на дне скважины.

Законченное представление о необходимости привлечения сведений об эволюции динамической структуры по стволу скважины для выработки решений по интенсификации очистки/снижению размеров «постельной» зоны шлама дают данные о структуре закрученного потока (методом подвижной стенки). Так, из рис. 7–10, 12 следует, что закрутка приводит как к смещению зоны интенсивного движения, так и к относительному увеличению ее размеров в радиальной плоскости. Причем в зависимости от подвижности стенки с ростом Ω интенсифицируются радиальные «перетечки» вещества из донной части скважины. Последнее весьма ценно для практики, т. к. повышает значение прогнозов по предлагаемой вычислительной методике.

Более того, результаты части 1 указывают, что выявленный неоднородный характер турбулентности в данном классе течений является преобладающим на протяжении всей области, простирающейся до середины ядра (центральной части сечения скважины над буровой трубой). Полученные при моделировании пространственные распределения компонент тензора напряжений Рейнольдса позволяют утверждать, что течение сильно турбулентно в ядре. И несмотря на то, что градиент скорости основного осредненного течения относительно небольшой, влияние молекулярной вязкости не является пренебрежимо малым.

Также для уяснения роли нормальных напряжений Рейнольдса ($\overline{u_i^2}$, $i=1,3$) в изменении структуры и, соответственно, кинетической энергии турбулентности (k) и псевдозавихренности (ω) (как главных параметров при построении корректных замыканий для членов высшего порядка в $RSS-k\omega$ -модели турбулентности) отметим следующее. Расчеты указывают, что все значения степени турбулентности (Tu) возрастают от минимальных в срединной части поперечного сечения до максимальных в непосредственной окрестности стенок кольцевого пространства. Предварительные исследования развивающихся сложных сдвиговых течений [23–29] показывают, что такие результаты моделирования в скважинах хорошо согласуются с соответствующими опытными данными других авторов по анализу внутренних гомогенных и гетерогенных сред (например, [29]).

Кроме того, исследование особенностей течений в слоях, близких к стенкам, демонстрирует, что в вязком подслое, где перенос импульса жидкой фазы за счет пульсаций скорости пренебрежимо мал по сравнению с переносом за счет молекулярного трения, роль переноса нормальной составляющей осевой компоненты вектора скорости (u'^2) очень существенна. Эта особенность течения смеси ценна для практики приложений, поскольку относительно высокие значения пульсаций осевой компоненты вектора скорости способствуют интенсификации возмущений в пристеночном течении жидкой фазы. Все это позволяет утверждать, что изменение вязкости в этой области играет весьма активную роль в развитии турбулентности и может использоваться для разрушения «постельного» слоя шлама и перемещения его в ядро потока для выноса из скважины.

Заключение

1. В данной работе приведены результаты *первой части* исследований, посвященных решению комплексных проблем, сопровождающих гидротранспорт реологически сложных смесей по скважинам с протяженным горизонтальным участком и их очистке от бурового шлама. В результате детального численного моделирования течений в рамках ПО ANSYS CFD приведены данные по моделированию и обоснованию вычислительной методики к предсказанию гидродинамики и массопереноса в высоковязкой дисперсной смеси. Расчеты выполнены в рамках математической модели с полной системой нелинейных дифференциальных уравнений второго порядка в частных производных по пространственным переменным. Данные уравнения представляют законы сохранения массы, импульса, описывающие динамику неоднородных гетерогенных сред, и позволяют установить: особенности движения частиц фаз, закономерности течения в эксцентричной области кольцевого межтрубного пространства, а также определить способы интенсификации процесса очистки скважин в условиях реального бурения.

Следует отметить, что все представленные результаты численных расчетов процесса гидротранспорта выполнены в диапазоне изменений характерных параметров, отвечающих условиям реального бурения. Так, принято, что в качестве рабочей несущей среды использовалась вязкая каплеобразная жидкость со свойствами пресной воды и жидкость типа Гершеля–Балкли. Причем вязко-инерционно-гравитационное течение смеси осуществлялось в скважине, включающей горизонтальный/наклонный участок с геометрической конфигурацией межтрубного пространства с размерами: длиной $L = 6...12$ м; внешним и внутренним диаметрами труб – 0,2 и 0,12 м соответственно. Реологические свойства раствора имеют значения: плотность – 1000 кг/м^3 ; плотность частиц песка – 2650 кг/м^3 и их диаметр – 0,006 м; эксцентриситет скважины – $e = 2b/(D-d)$ соответствует диапазону – 0...90 %; среднemasовая скорость потока в области

входа варьировалась в пределах – 1...3 м/с. Значения модельных констант жидкости типа Гершеля–Балкли лежат в рабочем диапазоне: предел текучести – 1...15 Па, индекс потока – 0,3...0,8; индекс консистенции – 0,3...1,8 Па·сⁿ; отношение диаметров канала – 0,5...0,7. Следует учитывать, что на интенсификацию неблагоприятных процессов, например, вызывающих заклинивание буровой колонны, оказывают влияние динамические процессы по генерации «мертвой» зоны, а также рост ее пространственных размеров. Последнее тесно связано с изменением эксцентричности пространства. Следовательно, контроль за высокой эксцентричностью – это важный признак поддержания безаварийного функционирования оборудования. Вместе с этим для достоверного прогноза рабочих механизмов гидротранспорта бурового шлама из скважины следует обратить внимание на корректность расчета параметров течения смеси в низкорейнольдсовых областях межтрубного пространства. Наш опыт расчета показывает, что математическая модель успешно прогнозирует изменения градиентов искомых величин при использовании разностных сеток с радиальным расположением узлов порядка $O(1,37...1,47) \cdot 10^5$. Это обеспечивает приемлемую точность расчета локальных параметров течения и массопереноса в смеси со значением порядка $O(10^{-5})$, что недостижимо в рамках использования любых других механистических, полуэмпирических моделей, а также инженерных методик по очистке скважин.

2. Расчетами установлены особенности изменений структуры прямого и закрученного (по методу подвижной стенки буровой трубы) положения, важные для практики инженерных исследований процессов бурения:

- При движении бурового раствора по коаксиальной и эксцентричной области межтрубного пространства скважины с протяженным горизонтальным участком в ее пристеночной (донной) зоне динамическая структура испытывает на себе активное влияние эффектов, направленных на развитие турбулентности. В сдвиговых процессах преобладает молекулярное трение. Причем в области вязкого подслоя проявляются особенности, характерные для вязкого демпфирования.
- В областях поперечного сечения, близких к ядру, проявляются особенности, обусловленные соизмеримостью молекулярного и молярного обмена импульсом в жидкой фазе. Причем здесь усиливаются диффузионные процессы, интенсифицирующие разрушение «постельного» слоя шлама. Именно в этой части радиального поперечного сечения скважины стоит учитывать механизмы переноса от максимального выделения турбулентной кинетической энергии на вынос шлама. Стоит отметить, что эта область очень чувствительна к изменению значений локальных чисел Рейнольдса турбулентности. Последнее также ценно для управления интенсивностью очистки.

- Анализ структуры в области ядра потока показывает, что эта зона с неоднородной анизотропной структурой турбулентных вихрей, для расчета которых следует обращаться к моделям турбулентности, естественным образом учитывающим динамику молярных образований по пространству скважины. И здесь расчеты процессов по численным методикам, опирающимся на модели, включающие понятие изотропной «скалярной» молярной вязкости, будут весьма приближенны, а рекомендации инженерному персоналу по организации безаварийного управления процессом бурения весьма условны.
3. В фундаментальном смысле результаты исследования (материала части 1 рассматриваемой проблемы) имеют особую ценность для определения представлений о возможностях вычислительной методики в прогнозе нетривиальных процессов в вязких пристеночных слоях сложного сдвигового течения смеси. Так, представленные сведения об эволюции структуры потока позволяют классифицировать распределения динамических параметров осредненного и пульсационного течения, режимы движения раствора, дают дополнительную полезную информацию о турбулентных течениях в эксцентричных областях скважины и о детальных изменениях пульсаций скорости в зонах, близких к стенке.
4. В целом результаты расчета показывают, что процесс гидротранспорта по своей природе неоднозначен из-за многих дополнительных эффектов, осложняющих течение и массоперенос в силу специфики распределений динамических параметров и характера влияния внешних и внутренних сил на частицы смеси.
- С учетом сказанного, в следующем разделе настоящей работы (часть 2 по исследованию проблем гидротранспорта и очистки от шлама горизонтальных столов скважин) предполагается привести новые результаты, важные для приложений, в частности, очистки скважин в условиях *in situ*. А также проанализировать особенности процесса бурения в реальных условиях с учетом выбора оптимальных значений реологических свойств раствора, опираясь на заключения, характеризующие преимущества разработанной в части 1 оригинальной вычислительной методики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Харламов С.Н., Джанхорбани М. Численный прогноз движения смеси вязкой капальной жидкости с твердыми частицами во входной области эксцентричных кольцевых труб и их очистки от шлама // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333. – № 6. – С. 18–41.
2. Харламов С.Н., Джанхорбани М. Оптимизация реологических свойств бурового раствора, интенсифицирующая транспорт и очистку горизонтальных скважин от шламов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333. – № 8. – С. 91–108.
3. Computational Fluid Dynamics (CFD) as a tool to study cutting transport in wellbores / H.I. Bilgesu, M.W. Ali, K. Aminian, S. Ameri // The Eastern Regional Meeting of the Society of Petroleum Engineers. – Lexington, Kentucky, USA, October, 2002. – 27 p.
4. Solid-liquid hydrodynamics in a slim hole drilling annulus / S.-M. Han, H. Young-Kyu, W. Nam-Sub, K. Young-Ju // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2010. – V. 70. – № 3–4. – P. 308–319.
5. Effect of drillpipe rotation on cuttings transport using computational fluid dynamics (CFD) in complex structure wells / S. Xiaofeng, K. Wang, T. Yan, S. Shao, J. Jiao // Journal of Petroleum Exploration and Production Technology. – 2014. – V. 4. – № 3. – P. 255–261.
6. Simulation of cuttings transport with foam in deviated wellbores using computational fluid dynamics / R. Rooki, D.A. Faramarz, A. Moradzadeh, M. Norouzi // Journal of Petroleum Exploration and Production Technology. – 2014. – V. 4. – № 3. – P. 263–273.
7. Ofei T.N., Irawan S., Pao W. CFD method for predicting annular pressure losses and cuttings concentration in eccentric horizontal wells // Journal of Petroleum Engineering. – 2014. – № 4. – P. 110–120.
8. Kamyab Mohammadreza, Vamegh Rasouli. Experimental and numerical simulation of cuttings transportation in coiled tubing drilling // Journal of Natural Gas Science and Engineering. – 2016. – V. 29. – P. 284–302.
9. Hole-cleaning performance comparison of oil-based and waterbased drilling fluids / S. Sneha, B. Lund, J.D. Ytrehus, A. Saasen // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2017. – V. 159. – P. 49–57.
10. Heydari Omid, Eghbal Sahraei, Pål Skalle. Investigating the impact of drillpipe's rotation and eccentricity on cuttings transport phenomenon in various horizontal annuluses using computational fluid dynamics (CFD) // Journal of petroleum science and engineering. – 2017. – V. 156. – P. 801–813.
11. Numerical prediction of flow behavior of cuttings carried by Herschel-Bulkley fluids in horizontal well using kinetic theory of granular flow / Pang Boxue, Shuyan Wang, Guodong Liu, Xiaoxue Jiang, Huilin Lu, Zhenjie Li // Powder Technology. – 2018. – V. 329. – P. 386–398.
12. Gidaspow D. Multiphase flow and fluidization: continuum and kinetic theory descriptions. – Sand Diego: Academic press, 1994. – 467 p.
13. Syamlal Madhava, T.J. O'Brien. The derivation of a drag coefficient formula from velocity-voidage correlations // Technical Note. – Morgantown, WV: US Department of energy, Office of Fossil Energy, NETL, 1987. – P. 1–11.
14. Mme U., Pål Skalle. CFD calculations of cuttings transport through drilling annuli at various angles // International Journal of Petroleum Science and Technology. – 2012. – V. 6. – № 2. – P. 129–141.
15. Epelle E.I., Gerogiorgis D.I. CFD modelling and simulation of drill cuttings transport efficiency in annular bends: effect of particle sphericity // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2018. – V. 170. – P. 992–1004.
16. Akhshik Siamak, Majid Rajabi. CFD-DEM modeling of cuttings transport in underbalanced drilling considering aerated mud effects and downhole conditions // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2018. – V. 160. – P. 229–246.
17. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. – М.: Наука, 1987. – Т. 1. – 464 с.
18. Yeoh G.H., Tu J. Computational techniques for multi-phase flows. 2nd ed. – Butterworth-Heinemann: Elsevier Ltd, Inc., 2019. – 590 p.
19. Crowe C.T. Review- numerical models for dilute gas-particle flows // ASME Journal of Fluids Engineering. – 1982. – V. 104 (Sept.). – P. 297–303.
20. Siamak Akhshik, Mehdi Behzad, Majid Rajabi. On the particle-particle contact effects on the hole cleaning process via a CFD-DEM model // An International Journal of Particulate Science and Technology. – 2016. – № 1. – P. 1–31.
21. Ansys Fluent Users Guide 13. Fluent Incorporated, ANSYS Inc. – Canonsburg: PA, USA, 2010. – 230 p.

22. Taibi H., Messelmi F. Effect of yield stress on the behavior of rigid zones during the laminar flow of Herschel–Bulkley fluid // Alexandria Engineering Journal. – 2018. – V. 57. – № 2. – P. 1109–1115.
23. Харламов С.Н., Фатьянов Д.С. Моделирование пространственных течений вязких сред в системе каналов с участками соединений сложной формы // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 5. – С. 70–88.
24. Харламов С.Н., Фатьянов Д.С. Исследование структуры турбулентного потока природного сырья в трубопроводах с секцией переменного по длине поперечного сечения конфузородиффузорного типа // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 8. – С. 53–67.
25. Харламов С.Н., Джангхорбани М. Численное моделирование течений вязких смесей бурового шлама и потока сырой нефти на горизонтальных участках скважин с эксцентричными буровыми трубами // Новые вызовы фундаментальной и прикладной геологии нефти и газа – XXI век: Материалы Всероссийской научной конференции с участием иностранных ученых, посвященную 150-летию акад. АН СССР И.М. Губкина и 110-летию акад. АН СССР и РАН А.А. Трофимука. Секция 2. Геология нефти и газа. Подсекция 3. Нефтегазопромысловая геология. – Новосибирск: ИПЦ НГУ, 2021. – С. 221–224. DOI: 10.25205/978-5-4437-1248-2-221-224.
26. Kharlamov S.N., Alginov R.A. Engineering approaches' progress in calculation of inhomogeneous turbulence in pipelines // Society of Petroleum Engineers – SPE Russian Oil and Gas Technical Conference and Exhibition. – Moscow, Russia, 2010. – V. 2. – P. 798–805.
27. Menter F.R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications // AIAA Journal. – 1994. – V. 32. – № 8. – P. 1598–1605.
28. Esch T., Menter F.R. Heat transfer predictions based on two-equation turbulence models with advanced wall treatment // Turbulence, Heat and Mass Transfer. – 2003. – № 4. – P. 633–640.
29. Бубенчиков А.М., Харламов С.Н. Математические модели неоднородной анизотропной турбулентности во внутренних течениях. – Томск: Томский государственный университет, 2001. – 448 с.
30. Харламов С.Н., Джангхорбани М., Филиппов К.А. Математическое моделирование и методы исследования гидродинамической очистки горизонтальных скважин // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 8. – С. 53–73.
31. Miloshevich H. Modelling of two-phased turbulent flows in jets with burning particles and phase transition in them // Proceedings of the 4th European CFD conference. – Athens, Greece, 1998. – V. 1. – Pt. 1. – P. 175–179.
32. Ди Джачинто М., Сабетта Р., Пива К. Эффекты двустороннего взаимодействия в газовых потоках с неплотным множеством частиц // Теоретические основы инженерных расчетов. – 1982. – Т. 104. – № 3. – С. 122–131.
33. Morsi S.A., Alexander A.J. An investigation of particle trajectories in two-phase flow systems // Journal of Fluid Mechanics. – 1972. – V. 55. – № 2. – P. 193–208.
34. Patankar S.V. Numerical heat transfer and fluid flow. – New York: McGraw-Hill, 1980. – 150 p.
35. Busch A. On particle transport and turbulence in wellbore flows of non-Newtonian fluids –findings from cuttings transport process analysis by means of computational fluid dynamics, rheometry and dimensional analysis. PhD Diss. – Norway, 2020. – 187 p.
36. Liu Gefei. Applied well cementing engineering. – Burlington: Gulf Professional Publ. Elsevier, 2021. – 621 p.
37. Харламов С.Н., Джангхорбани М. Процессы транспорта шлама при очистке скважин с произвольной ориентацией буровых труб, содержащих эксцентрично расположенное круглое ядро с подвижной стенкой: проблемы, результаты, перспективы (обзор) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 7. – С. 131–149.
38. Подрябинкин Е.В. Моделирование течений ньютоновских и неньютоновских жидкостей в цилиндрическом зазоре: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. – Новосибирск, 2014. – 28 с.
39. Численный алгоритм для моделирования установившегося ламинарного течения неньютоновской жидкости в кольцевом зазоре с эксцентриситетом / А.А. Гаврилов, А.В. Минаков, А.А. Дектярев, В.Я. Рудяк // Вычислительные технологии. – 2012. – Т. 17. – № – С. 44–56.
40. Харламов С.Н., Джангхорбани М. Численное исследование вязкостно-инерционного ламинарного закрученного течения в круглой трубе с эксцентричным круглым ядром // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 11. – С. 7–21.
41. Харламов С.Н., Джангхорбани М., Брыксин М.Р. К проблеме установления продолжительности бурения скважин в условиях отсутствия вращения буровой колонны // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333. – № 9. – С. 7–26.
42. Kharlamov S.N., Janghorbani M., Bryksin M.R. Aspects of computer simulation of transport and cleaning processes from cuttings in horizontal well sections // Mathematical Models and Computer Simulations. – 2023. – V. 15. – № 3. – P. 502–519.

Поступила: 10.05.2023 г.

Прошла рецензирование: 28.05.2023 г.

Информация об авторах

Харламов С.Н., профессор, доктор физико-математических наук, профессор отделения нефтегазового дела, Инженерная школа природных ресурсов, Национальный исследовательский Томский политехнический университет.

Джангхорбани М., аспирант, отделение нефтегазового дела, Инженерная школа природных ресурсов, Национальный исследовательский Томский политехнический университет.

Зайковский В.В., начальник нефтеперекачивающей станции «Орловка», Филиал Томского нефтепроводного управления АО «Транснефть – Западная Сибирь».

TRANSPORTATION OF CUTTINGS BY DRILLING MUD IN HORIZONTAL WELLS. PART 1. MODELING THE STRUCTURE OF DISPERSED CURRENTS

Sergey N. Kharlamov¹,
kharsn@mail.ru

Mehran Janghorbani¹,
mehran.janghorbani@gmail.com

Vsevolod V. Zaykovskiy²,
4lk4st@gmail.com

¹ National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

² Branch of Tomsk Oil Pipeline Administration of «Transneft – Western Siberia» Joint Stock Company,
24, River Ushayka embankment, Tomsk, 634050, Russia.

The relevance of the research is associated with the development of technical solutions for drilling wells with horizontal endings, in which cleaning the annulus from particles of drilled cuttings in hydraulic transport conditions seems technologically and economically efficient compared to other, for example, mechanical methods.

The aim of the article is to develop a computational methodology/approach to a detailed forecast and deep understanding of the physical mechanism of hydraulic transport influence on well cleaning intensity. Moreover, the strategy of such a study is focused on the choice of flow conditions/rheological parameters of the model, in which the obtained detailed theoretical information on the evolution of the dynamic flow structure should be used in the development of design methods and the formulation of recommendations to engineering personnel for emergency warnings.

The object of this study is a new class of viscous currents of dispersed media induced by external and internal forces, characteristic of the functioning of special equipment that ensures the movement of drilling mud with complex rheology in a well through an eccentric annular annulus.

Results. The given article is the first part of the study devoted to solving complex problems accompanying the hydraulic transfer of rheologically complex mixtures through wells with an extended horizontal section and their cleaning from drilling cuttings. The first part presents the data on reasonable modeling of hydrodynamics of viscous dispersed mixture within the framework of reference to full equations describing laws of mass conservation, impulse for detection of peculiarities, determination of flow regularities in eccentric area of annular annulus, as well as search for ways of cleaning intensification under conditions of real drilling. It is assumed that the viscous-inertial-gravitational flow of a liquid of the Herschel–Bulkly type with solid particles (sand) is carried out in conditions of laminar-turbulent, straight-flow and twisted (by the method of a movable wall) flow developing in the space. It is noted that the formation of modes with active and conservative action of external and internal forces allows efficient cleaning of the annulus. System of defining equations of mathematical model of hydrodynamics and mass transfer is analyzed for possibility of taking into account changes in nonlinearity of thermophysical properties, resistance to disturbances at boundaries of flow area and phase separation. It is noted that the prediction of molar processes is carried out within the framework of modern statistical models of the RANS method and the Euler–Lagrangian approach to describing the movement of heterogeneous media implemented in the ANSYS CFD software. It was shown that at real drilling conditions, the mathematical model is successful in determining the spectrum of local and integral parameters of hydrodynamics and mass transfer in a wide range of changes in drilling conditions, which make it possible to understand the effects of particle sedimentation on the lower wall, the dynamics of vortex separation and the transfer of particles to the low-Reynolds region with a suspended state of the mixture structure and the inertial zone of the flow core. It is noted that the intensity of hydraulic transport downstream is significantly influenced by the conditions of phase entry, mud rheological characteristics. The calculations established the flow areas with satisfactory agreement of dynamic characteristics of the flow according to the proposed model with available experimental data, for example, shear stress at the wall, radial distributions of the components of the fluid velocity vector along the length of the well at different angles of deviation of its borehole from the vertical. Moreover, the results of this article should be taken into account when describing the data of the second part, as an addition to the study of hydraulic transport according to the proposed technique of real drilling of horizontal wells with optimal rheological properties of the mud.

Key words:

well, horizontal section, eccentricity, drilling, modeling, hydrodynamics, rheology, cuttings, cleaning.

REFERENCES

1. Kharlamov S.N., Janhorbani M. Numerical prediction of flow of viscous drip liquid mixture with solid particles in inlet field of eccentric annular tubes and cleaning them from sludge. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, no. 6, pp.18 – 41. In Rus.
2. Kharlamov S.N., Janhorbani M. Optimization of rheological properties of drilling mud intensifying transportation and cleaning of horizontal wells from cuttings. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, no. 8, pp. 91–108. In Rus.
3. Bilgesu H.I., Ali M.W., Aminian K., Ameri S. Computational Fluid Dynamics (CFD) as a tool to study cutting transport in wellbores. *The Eastern Regional Meeting of the Society of Petroleum Engineers*. Lexington, Kentucky, USA, October, 2002. 27 p.
4. Han S.-M., Young-Kyu H., Nam-Sub W., Young-Ju K. Solid-liquid hydrodynamics in a slim hole drilling annulus. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2010, vol. 70, no. 3–4, pp. 308–319.

5. Xiaofeng S., Wang K., Yan T., Shao S., Jiao J. Effect of drillpipe rotation on cuttings transport using computational fluid dynamics (CFD) in complex structure wells. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 2014, vol. 4, no. 3, pp. 255–261.
6. Rooki R., Faramarz D.A., Moradzadeh A., Norouzi M. Simulation of cuttings transport with foam in deviated wellbores using computational fluid dynamics. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 2014, vol. 4, no 3, pp. 263–273.
7. Ofei T.N., Irawan S., Pao W. CFD method for predicting annular pressure losses and cuttings concentration in eccentric horizontal wells. *Journal of Petroleum Engineering*, 2014, no. 4, pp. 110–120.
8. Kamyab Mohammadreza, Vamegh Rasouli. Experimental and numerical simulation of cuttings transportation in coiled tubing drilling. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2016, vol. 29, pp. 284–302.
9. Sneha S., Lund B., Ytrehus J.D., Saasen A. Hole-cleaning performance comparison of oil-based and waterbased drilling fluids. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2017, vol. 159, pp. 49–57.
10. Heydari Omid, Eghbal Sahraei, Pål Skalle. Investigating the impact of drillpipe's rotation and eccentricity on cuttings transport phenomenon in various horizontal annuli using computational fluid dynamics (CFD). *Journal of petroleum science and engineering*, 2017, vol. 156, pp. 801–813.
11. Pang Boxue, Shuyan Wang, Guodong Liu, Xiaoxue Jiang, Huilin Lu, Zhenjie Li. Numerical prediction of flow behavior of cuttings carried by Herschel–Bulkley fluids in horizontal well using kinetic theory of granular flow. *Powder Technology*, 2018, vol. 329, pp. 386–398.
12. Gidaspow D. *Multiphase flow and fluidization: continuum and kinetic theory descriptions*. Sand Diego, Academic press, 1994. 467 p.
13. Syamlal Madhava, O'Brien T.J. The derivation of a drag coefficient formula from velocity-voidage correlations. *Technical Note*. Morgantown, WV, US Department of energy, Office of Fossil Energy, NETL, 1987. pp. 1–11.
14. Mme U., Pål Skalle. CFD calculations of cuttings transport through drilling annuli at various angles. *International Journal of Petroleum Science and Technology*, 2012, vol. 6, no. 2, pp. 129–141.
15. Epelle E.I., Gerogiorgis D.I. CFD modelling and simulation of drill cuttings transport efficiency in annular bends: effect of particle sphericity. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2018, vol. 170, pp. 992–1004.
16. Akhshik Siamak, Majid Rajabi. CFD-DEM modeling of cuttings transport in underbalanced drilling considering aerated mud effects and downhole conditions. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2018, vol. 160, pp. 229–246.
17. Nigmatulin R.I. *Dinamika mnogofaznykh sred* [Dynamics of multiphase media]. Moscow, Nauka Publ., 1987. Vol. 1, 464 p.
18. Yeoh G.H., Tu J. *Computational techniques for multi-phase flows*. 2nd ed. Butterworth-Heinemann, Elsevier Ltd, Inc., 2019. 590 p.
19. Crowe C.T. Review – numerical models for dilute gas-particle flows. *ASME Journal of Fluids Engineering*, 1982, vol. 104 (Sept.), pp. 297–303.
20. Siamak Akhshik, Mehdi Behzad, Majid Rajabi. On the particle-particle contact effects on the hole cleaning process via a CFD-DEM model. *An International Journal of Particulate Science and Technology*, 2016, no. 1, pp. 1–31.
21. *Ansys Fluent Users Guide 13*. *Fluent Incorporated, ANSYS Inc.* Canonsburg, PA, USA, 2010. 230 p.
22. Taibi H., Messelmi F. Effect of yield stress on the behavior of rigid zones during the laminar flow of Herschel–Bulkley fluid. *Alexandria Engineering Journal*, 2018, vol. 57, no. 2, pp. 1109–1115.
23. Kharlamov S.N., Fatyanov D.S. Simulation of viscous media spatial flows in the system of channels with sections of complex form junctions. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 5, pp. 70–88. In Rus.
24. Kharlamov S.N., Fatyanov D.S. Investigation of natural raw materials turbulent flow structure in pipelines at confuser-diffuser section. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 8, pp. 53–67. In Rus.
25. Kharlamov S.N., Janghorbani M. Chislennoe modelirovanie tekhnicheskikh vyazkikh smesey burovogo shlama i potoka syroy nefti na gorizontalnykh uchastkakh skvazhin s ekstsentrichnymi burilnymi troobami [Numerical modeling of the currents of viscoustmixtures of drilling sludge and the flow of crude oil on horizontal sections of wells with eccentric drilling pipes]. *Novye vyzovy fundamentalnoy i prikladnoy geologii nefti i gaza – XXI vek. Materialy Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii s uchastiem inostrannykh utchenykh, posvyazhennoy 150-letiyu akademika AN SSSR I.M. Gubkina i 110-letiyu akademika AN SSSR i RAN A.A. Trofimuka. Sektsiya 2. Geologiya nefti i gaza. Podseksiya 3. Neftpromyslovaya geologiya* [New challenges of fundamental and applied geology of oil and gas-XXI century. Materials of the All-Russian Scientific Conference with the participation of foreign scientists, dedicated to the 150th anniversary I.M. Gubkin, the Academy of Sciences of the USSR and the 110th anniversary acad. A.A. Trofimuk. Section 2. Geology of oil and gas. Subsection 3. Oil and gas geology]. Novosibirsk, CPI NSU, 2021. pp. 221–224. DOI: 10.25205/978-5-4437-1248-2-221-224
26. Kharlamov S.N., Alginov R.A. Engineering approaches' progress in calculation of inhomogeneous turbulence in pipelines. *Society of Petroleum Engineers – SPE Russian Oil and Gas Technical Conference and Exhibition*. Moscow, Russia, 2010, vol. 2, pp. 798–805.
27. Menter F.R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. *AIAA Journal*, 1994, vol. 32, no. 8, pp. 1598–1605.
28. Esch T., Menter F.R. Heat transfer predictions based on two-equation turbulence models with advanced wall treatment. *Turbulence, Heat and Mass Transfer*, 2003, no. 4, pp. 633–640.
29. Bubenchikov A.M., Kharlamov S.N. *Matematicheskie modeli neodnorodnoy anizotropnoy turbulentnosti vo vnutrennikh stromakh* [Mathematical models of inhomogeneous anisotropic turbulence at the internal flows]. Tomsk, Tomsk State University of Publ. house, 2001. 448 p.
30. Kharlamov S.N., Janghorbani M., Filippov K.A. Mathematical modeling and research methods of horizontal wells hydrodynamic cleaning. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 8, pp. 53–73. In Rus.
31. Miloshevich H. Modelling of two-phased turbulent flows in jets with burning particles and phase transition in them. *Proceedings of the 4th European CFD conference*. Athens, Greece, 1998. Vol. 1, pt. 1, pp. 175–179.
32. Di Giacinto M., Sabetta R., Piva K. Effects of two-way interaction in gas flows with a loose set of particles. *Theoretical foundations of engineering calculations*, 1982, vol. 104, no 3, pp. 122–131. In Rus.
33. Morsi S.A., Alexander A.J. An investigation of particle trajectories in two-phase flow systems. *Journal of Fluid Mechanics*, 1972, vol. 55, no. 2, pp. 193–208.
34. Patankar S.V. *Numerical heat transfer and fluid flow*. New York, McGraw-Hill, 1980. 150 p.
35. Busch A. *On particle transport and turbulence in wellbore flows of non-Newtonian fluids – findings from cuttings transport process analysis by means of computational fluid dynamics, rheometry and dimensional analysis*. PhD Diss, Norway, 2020. 187 p.
36. Liu Gefei. *Applied well cementing engineering*. Burlington, Gulf Professional Publishing, Elsevier, 2021. 621 p.
37. Kharlamov S.N., Janghorbani M. Cuttings transport in hole cleaning considering well orientation, pipe eccentricity and pipe rotation: problems, results, prospects (survey). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 7, pp. 131–149. In Rus.
38. Podryabinkin E.V. *Modelirovanie tekhnicheskikh nyutonovskikh i nenyutonovskikh zhidkostey v tshilindricheskom zazore*. Avtoreferat Diss. Kand. nauk [Modeling the currents of Newtonian and non-Newtonian liquids in a cylindrical gap. Cand. Diss Abstract]. Novosibirsk, 2014. 28 p.
39. Gavrilov A.A., Minakov A.V., Dektyarev A.A., Rudyak V.Ya. Chislenny algoritm dlya modelirovaniya ustanovivshikhsya laminarnykh tekhnicheskikh nenyutonovskikh zhidkostey v koltsevom zazore s ekstsentrisitetom [Numerical algorithm for simulation of steady laminar flow of non-Newtonian fluid in annular gap with eccentricity]. *Vyichislitelnye tekhnologii*, 2012, vol. 17, no. 1, pp. 44–56.
40. Kharlamov S.N., Janghorbani M. Numerical simulation of viscous – inertial laminar swirling flow in a circular tube with an eccentric round core. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 11, pp. 7–21. In Rus.

41. Kharlamov S.N., Janghorbani M., Bryksin M.R. On the issue of establishing the duration of well drilling without the drill string rotation. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, no. 9, pp. 7–26. In Rus.
42. Kharlamov S.N., Janghorbani M., Bryksin M.R. Aspects of computer simulation of transport and cleaning processes from cuttings in horizontal well sections. *Mathematical Models and Computer Simulations*, 2023, vol. 15, no. 3, pp. 502–519.

Received: 10 May 2023.

Reviewed: 28 May 2023.

Information about the authors

Sergey N. Kharlamov, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Mehran Janghorbani, postgraduate student, National Research Tomsk Polytechnic University.

Vsevolod V. Zaykovskiy, head of the oil pumping station «Orlovka», Branch of Tomsk Oil Pipeline Administration of «Transneft – Western Siberia» Joint Stock Company.

УДК 691.54

ВТОРИЧНЫЕ РЕСУРСЫ В ПРОИЗВОДСТВЕ КОМПОЗИЦИОННЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ЦЕМЕНТА

Копаница Наталья Олеговна¹,
kopanitsa@mail.ru

Демьяненко Ольга Викторовна¹,
demyanenko.olga.v@gmail.com

Куликова Анжелика Андреевна¹,
lika.panda.19@gmail.com

Ткач Евгения Владимировна²,
ev_tkach@mail.ru

Шестаков Николай Игоревич²,
nik.shestakov.1990@mail.ru

Степина Ирина Васильевна²,
stepinaiv@mgsu.ru

¹ Томский государственный архитектурно-строительный университет,
Россия, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2.

² Московский государственный строительный университет,
Россия, 129337, г. Москва, Ярославское ш., 26.

Актуальность исследования обусловлена важностью проблемы рационального использования природных ресурсов в производстве композиционных строительных материалов. Возможность частичной замены природного невозобновляемого сырья, используемого в производстве многотонажных бетонных и растворных смесей на основе цемента, вторичными продуктами производства различных отраслей позволит решить проблемы: ресурсосбережения, энергопотребления и экологии. Строительная отрасль является крупнейшим потребителем побочных продуктов горнодобывающих предприятий: вскрышных пород и отходов горно-обогатительных предприятий, а это сотни миллионов тонн в год. Наиболее изученными являются вопросы, связанные с применением их в качестве мелкого и крупного заполнителя в бетонных и растворных смесях различного назначения. Расширение возможности применения в производстве композиционных строительных материалов вторичных продуктов производства горнодобывающих предприятий связано с получением на их основе активных минеральных добавок, наполнителей в бетонные и растворные смеси, а также энергетически активных наномодификаторов. Применение побочных продуктов различного химического состава и дисперсности позволяет направленно регулировать процессы структурообразования и твердения композиционных материалов на основе цемента и получать композиционные материалы с требуемыми эксплуатационными свойствами

Цель: научно обосновать и исследовать возможность применения отходов горнодобывающих предприятий в качестве компонентов в бетонные и растворные смеси на основе цемента.

Объекты: модифицирующие добавки на основе вторичных продуктов; композиционные материалы с повышенными эксплуатационными свойствами.

Методы: определение нормальной плотности, сроков твердения, прочности при изгибе и при сжатии по ГОСТ; термический анализ; электронная микроскопия, рентгенофазовый анализ, колориметрия.

Результаты. Представлены результаты исследований, необходимых для научного обоснования, разработки и внедрения в строительную отрасль технологии производства строительных растворных смесей, полученных с использованием вторичных продуктов горнодобывающих предприятий. Представлены сравнительные результаты исследований по влиянию комплексной добавки микрокальцита и нано-SiO₂ на свойства цементных систем. Показано, что введение комплексной добавки повышает прочность на сжатие цементного камня, позволяет сократить расход цемента без снижения его нормативных характеристик и повысить эксплуатационные свойства бетона.

Ключевые слова:

Вязущее, цементные композиции, микрокальцит, наномодифицирующие добавки, вторичные продукты производства.

Введение

Повышение негативного влияния промышленных объектов на окружающую среду сопровождается истощением природных ресурсов и нарушением динамического равновесия биосферы. В этой связи особую актуальность приобретает концепция устойчивого развития регионов, в основе которой – разработка природоохранных и ресурсосберегающих технологий

строительных материалов. Поэтому научное и экспериментальное обоснование возможностей рационального использования вторичных продуктов различного химического состава и структуры в производстве строительных материалов является актуальной задачей. Наиболее значимыми для развития строительной отрасли являются бетонные и растворные смеси на основе цементного вяжущего. Стратегией ресурсного

обеспечения строительного комплекса России до 2030 г. предусматривается развитие инновационных технологий производства цементных бетонов с высокими показателями физико-механических свойств. Для повышения качества и востребованности готового продукта необходимы новые знания о процессах структурообразования в цементном камне на макро- и микроуровне с участием полифункциональных химически активных добавок и микронаполнителей. Для решения этих задач необходимо научно обосновать выбор компонентов композиционных материалов, разработать многоуровневые полифункциональные добавки, включающие нанообъекты и техногенные продукты и исследовать их влияние на свойства композиционных строительных материалов [1, 2].

Проблеме повышения эксплуатационных характеристик бетонов и растворов с применением различных модифицирующих и наномодифицирующих добавок посвящены труды многих отечественных и зарубежных исследователей. В их работах [3–13] отмечаются преимущества мелкозернистой структуры затвердевшего бетона и возможность регулирования в широком интервале его свойств, в том числе и различными по составу и свойствам модифицирующими добавками. Эффективность применения в бетонах и растворах тонкодисперсных минеральных наполнителей (зола, тонкомолотые шлаки, микрокремнезем, карбонатная мука и др.), с целью улучшения их свойств, не вызывает сомнений. При этом вопросы по механизму взаимодействия компонентов бетонной смеси с модифицирующими добавками, закономерностям формирования плотной структуры цементного камня и композиционного камня с добавками высокой степени дисперсности, в том числе и наноразмерных компонентов, остаются недостаточно изученными. Цементный бетон является основным строительным материалом XXI в., его потребление в мире неуклонно растет, одним из важных факторов непереходящего интереса к этому материалу является: минимальная энергоемкость и наибольшие возможности утилизации вторичных материальных ресурсов: крупнотоннажных отходов промышленности, теплоэнергетики, строительства, а также способности к вторичной переработке. При этом хотя технологии производства бетонов и растворов постоянно совершенствуются, производство портландцемента как основного компонента бетонных и растворных смесей по-прежнему не отвечает современным экологическим вызовам, связанным со значительным объемом выбросов CO_2 при его производстве, что требует эффективных решений. Большая часть выбросов углекислого газа (около 60 %) образуется в результате химического разложения карбоната кальция, входящего в состав минералов портландцементного клинкера. Объемы выбросов могут быть уменьшены за счет снижения содержания клинкера в цементе, а также с помощью альтернативных методов производства цемента, таких как использование тонкодисперсных добавок на основе вторичного сырья промышленного производства и переработки горных пород: шлаков, зол, микрокремнезема, карбонатной му-

ки. Присутствие в строительной смеси эффективных модифицирующих добавок может обеспечить снижение расхода цемента на 1 м^3 растворной или бетонной смеси до 15–30 % [14, 15].

В последние годы учеными проводятся исследования в области получения и применения ультрадисперсных материалов в составах бетонных смесей различного назначения. В связи со сложившейся экономической ситуацией российский рынок строительных материалов на сегодняшний день должен ориентироваться на импортозамещение. Эффективное использование местного доступного сырья и вторичных продуктов для производства новых строительных материалов или получения модифицирующих добавок является актуальной проблемой для всех регионов России. Результаты исследований, как российских, так и зарубежных ученых, показывают эффективность использования местных материалов и побочных продуктов в качестве компонентов бетонных и растворных смесей не только с точки зрения снижения затрат на транспортные расходы, но и улучшения строительно-технических характеристик продукции [16–19].

Вместе с тем в состав многих добавок, разрабатываемых на основе вторичного сырья, входят химические соединения, традиционно не используемые в строительстве, механизмы, действия которых на процессы гидратации и твердения цементных и смешанных систем исследованы недостаточно. Поэтому для получения эффективных модифицирующих добавок с использованием вторичного сырья необходима разработка технологий их подготовки, переработки, а также исследования процессов гидратации, твердения цементных вяжущих, обеспечивающих формирование прочностных свойств и долговечности композиционных материалов. Опыт применения полифункциональных модифицирующих добавок в бетонные смеси показывает, что комплексные добавки более эффективны с точки зрения технологии и экономики, чем однокомпонентные добавки, которые, наряду с улучшением каких-либо свойств бетона или бетонной смеси, могут ухудшить или существенно снизить другие технологические показатели. Применение таких добавок позволяет регулировать процессы гидратации цемента, структуру цементного камня и бетона, замедлять его старение и повышать долговечность, что обеспечит высокие эксплуатационные характеристики бетонных изделий и конструкций.

Анализ литературных данных, посвященных данным проблемам, показывает, что большое количество местного сырья и вторичных ресурсов различных отраслей промышленности в большинстве регионов страны используется недостаточно [10, 11, 20].

Таким образом, исследование возможности использования вторичного сырья различных отраслей промышленности в качестве сырьевой базы для получения модифицирующих добавок, наполнителей и вяжущих материалов на сегодняшнем уровне развития производства становится актуальным, поскольку позволяет комплексно решать проблему повышения эффективности и качества строительного производ-

ства и снижать экологический ущерб окружающей среде. Полученные результаты исследований, представленные в работах [15, 21, 22], позволили установить возможность рационального использования карбонатных отходов (микрокальцита) горнодобывающих предприятий как эффективную добавку в цементные композиции, что позволит существенно снизить нагрузку на сырьевую базу и внести вклад в решение экологических проблем. Сравнительные результаты исследований по влиянию добавки микрокальцита разных месторождений на свойства цементных систем показывают, что введение добавки микрокальцита (МСа) при ее оптимальном значении обеспечивает существенное повышение предела прочности при изгибе и сжатии цементного камня и строительного раствора. Эффективность влияния добавки микрокальцита на свойства цементных композиций зависит от его минералогического состава и величины удельной поверхности. Введение добавки микрокальцита способствует появлению дополнительных центров кристаллизации при твердении цементного теста, образованию дополнительного количества низкоосновных гидросиликатов кальция, уплотняет структуру цементного камня и строительной смеси.

Применение микрокальцита в технологии производства строительных смесей в качестве наполнителя известно и достаточно изучено [20, 23]. CaCO_3 обладает низкой растворимостью, не образует кристаллогидратов, химически не взаимодействует с водой, и содержит катионы, входящие в состав большинства клинкерных минералов. В строительных композитах и бетонах наполнители играют активную структурообразующую роль, тесно связанную с механизмом их контактных и адгезионных свойств. Важной особенностью микрокальцита является его химическое сходство с продуктами гидратации цементного камня. Причиной химической активности карбонатных пород является образование в системе «карбонат–цемент» гидрокарбосиликата кальция, гидрокарбоната кальция – $\text{CaCO}_3 \cdot \text{Ca}(\text{OH})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$.

В работах [24–26] показано, что добавка в цементное вяжущее нано- SiO_2 (размер частиц до 40 нм) в количестве 0,03 % от массы цемента повышает прочность при сжатии цементного камня до 32 % по сравнению с контрольными образцами, что связано с образованием дополнительного количества высокопрочных низкоосновных гидросиликатов кальция и увеличением центров кристаллизации на первичной стадии гидратации цемента, а также является инициатором формирования структуры и прочностных свойств в системе «нано- SiO_2 – микродисперсный компонент – цемент». Предполагается, что тонкодисперсный порошок МСа совместно с нано- SiO_2 обеспечит более полное связывание $\text{Ca}(\text{OH})_2$ при твердении портландцемента, формируя дополнительные центры кристаллизации.

Исследования в данной работе проводились с целью разработки эффективных составов строительных смесей с повышенными эксплуатационными свойствами при использовании вторичных продуктов производства.

Материалы и методы

Для проведения исследований использовались следующие материалы.

Вяжущее: портландцемент ЦЕМ I 42,5Н Топкинского цементного завода. Характеристики вяжущего удовлетворяют требованиям ГОСТ 31108-2020 «Цементы общестроительные. Технические условия».

Модифицирующие добавки:

- микрокальцит (МСа), многотоннажный отход, образующийся при дроблении мрамора МК-5 по ТУ 5743-002-671431849-2015 на Ново-Ивановском карьере вблизи г. Полевского, ООО «Эверест». Характеристики по минералогическому составу и свойствам представлены в табл. 1.

Таблица 1. Минералогический состав и физические свойства микрокальцита

Table 1. Mineralogical composition and physical properties of microcalcite

Состав и свойства/Composition and properties	Показатели/Indices
CaCO_3 , %	97–99
$\text{CaMg}[\text{CO}_3]_2$, %	не более 0,3 no more than 0,3
SiO_2 , %	не более 0,2 no more than 0,2
SO_3 , %	–
FeS_2 , %	не более 0,1 no more than 0,1
Полевые шпаты/Feldspars, %	–
Гидроокислы железа/Iron hydroxides, %	
Глинистые/Clayey	
Массовая доля летучих веществ, % Mass fraction of volatile substances, %	не более 0,3 no more than 0,3
Массовая доля веществ растворимых в воде, % Mass fraction of substances soluble in water, %	
Плотность (ISO 787/10), kg/m^3 Density (ISO 787/10), kg/m^3	2740
Удельная поверхность, m^2/kg Specific surface area, m^2/kg	250

- наноразмерный диоксид кремния (нано- SiO_2), получен плазменно-дуговым методом, разработанным в ТГАСУ [27], в качестве сырья использовался диатомит (вскрышная порода). Наночастицы полученного порошка имеют распределение по размерам в диапазоне от 10 до 300 нм. Удельная поверхность нано- SiO_2 составляет $40000 \text{ m}^2/\text{kg}$.

На рис. 1 представлены результаты сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) и энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy).

Заполнитель: в качестве заполнителя использовался песок Виллинского месторождения Томского района с модулем крупности $M_k=1,8$, удовлетворяющий требованиям ГОСТ 8736-2014 «Песок для строительных работ».

Для оценки влияния комплексной добавки микрокальцита и нано- SiO_2 на свойства цементного камня готовились образцы-кубики $20 \times 20 \times 20$ мм из цементного теста нормальной густоты, которые хранились в нормальных условиях ($T=20 \pm 2$ °C, $W=90-100$ %) и испытывались на прочность в 28 суточном возрасте (ГОСТ 30744-2001).

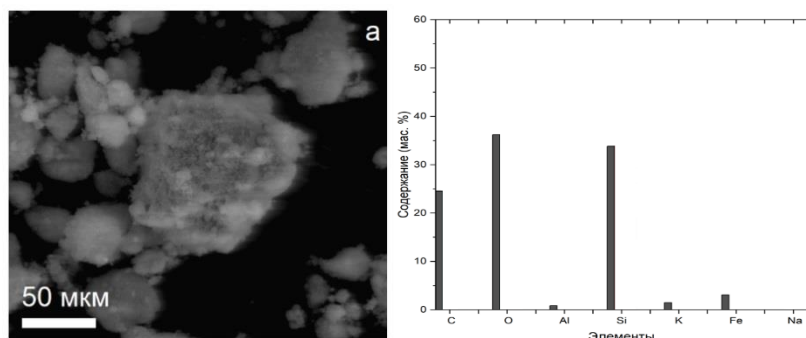


Рис. 1. СЭМ nano-SiO₂ и энергодисперсионный анализ рентгеновской спектроскопии

Fig. 1. Scanning electron microscopy of nano-SiO₂ and energy-dispersive analysis of X-ray spectroscopy

Для изучения влияния комплексной добавки на свойства цементно-песчаного раствора формовались образцы-балочки 40×40×160 мм, контрольный и модифицированный. Образцы хранились в нормальных условиях ($T=20\pm 2$ °C, $W=90-100$ %) и испытывались на изгиб и на сжатие в 7 и 28 сутокном возрасте.

Обсуждение результатов

Для оценки совместного влияния комплексной модифицирующей добавки на физико-механические свойства цементного камня были изготовлены образцы при равном соотношении цемента с различным содержанием микроальцита – 2,5; 5; 7,5, 10 % от массы цемента и наномодификатора nano-SiO₂ в количестве 0,03 % от массы цемента (составы 2–5), в сравнении с контрольным составом 1.

В работе представлены также результаты исследований по возможности снижения расхода цемента в строительной смеси при введении предложенной комплексной добавки. Содержание портландцемента уменьшалось пропорционально количеству введенной комплексной добавки (2,5–10 %) – составы 6–9.

Для каждого состава готовились не менее 20 образцов. Значение прочности определялось как среднеарифметическое значение из 5 образцов на каждый срок твердения, коэффициент вариации не более 5 %. Составы исследуемых образцов представлены в табл. 2.

Таблица 2. Составы исследуемых образцов

Table 2. Compositions of the studied samples

№ состава Composition no.	ПЦ Portland cement, %	МСа, %	Нано-SiO ₂ , % Nano-SiO ₂ , %
1 Контрольный Control	100	–	–
2 Ц+МСа2,5 %	100	2,5	0,03
3 Ц+МСа5 %	100	5,0	0,03
4 Ц+МСа7,5 %	100	7,5	0,03
5 Ц+МСа10 %	100	10	0,03
6 Ц–МСа2,5 %	97,50	2,5	0,03
7 Ц–МСа5 %	94,97	5,0	0,03
8 Ц–МСа7,5 %	92,47	7,5	0,03
9 Ц–МСа10 %	89,97	10	0,03

При совместном действии МСа и nano-SiO₂ увеличение прочности при сжатии в возрасте 28 суток твердения у всех составов составляет от 30 до 51 % (табл. 3).

Состав 3 с добавкой, состоящей из МСа и nano-SiO₂, в соотношении 5 и 0,03 % соответственно, от

массы цемента, показывает наибольший рост значения прочности, которое составляет 51,3 % по сравнению с контрольным составом.

При замене цемента на количество введенной добавки также можно наблюдать рост прочности у всех составов. У состава 7 с содержанием МСа – 5 % и nano-SiO₂ – 0,03 %, увеличение прочности составляет 47,7 %, при этом снижается водопотребность.

Известно, что показатель водопотребности цементного теста в значительной степени зависит от минералогического состава вяжущего и от дисперсности компонентов цементной смеси. Исследования по определению нормальной густоты цементного вяжущего проводились по стандартной методике. С введением комплексной добавки, состоящей из МСа – 5 % и nano-SiO₂ – 0,03 %, и снижением расхода цемента на 5 % водопотребность уменьшается на 1 % (нормальная густота 27,2 %). Снижение нормальной густоты может быть связано с адсорбцией добавки на гидратирующихся цементных зёрнах и уменьшением их слипания между собой при замене цемента 5 % МСа.

Таблица 3. Результаты исследования физико-механических характеристик составов

Table 3. Results of the study of the physical and mechanical characteristics of the compositions

№ состава Composition no.	Нормальная густота Normal density	Сроки схватывания, мин Setting time, min		Прочность при сжатии в возрасте 28 суток твердения, МПа Compressive strength at the age of 28 days of curing, MPa
		Начало Start	Конец End	
1 Контрольный Control	27,5	180	240	68,1
2 Ц+МСа2,5	27,8	185	225	93,9
3 Ц+МСа5	28,2	160	220	103,1
4 Ц+МСа7,5	28,5	160	225	91,0
5 Ц+МСа10	28,7	160	225	87,2
6 Ц–МСа2,5	27,2	185	225	90,9
7 Ц–МСа5	27,2	160	210	100,6
8 Ц–МСа7,5	27,5	160	225	91,4
9 Ц–МСа10	27,7	150	220	87,35

Добавка также оказывает влияние на сроки схватывания цементного теста (табл. 3). Введение добавок позволяет сократить сроки схватывания цементного теста: начало схватывания – на 20 минут, конец схватывания – 25–30 минут.

Анализ представленных в табл. 3 результатов позволил выбрать рациональный состав вяжущего (№ 7) с заменой цемента добавкой микрокальцита 5 %, так как прирост прочности в возрасте 28 суток твердения составил 47,7 %, по сравнению с контрольным (со-

став 1) при сокращении расхода вяжущего и снижении нормальной густоты.

На рис. 2, 3 представлены термограммы контрольного и модифицированного цементного камня.

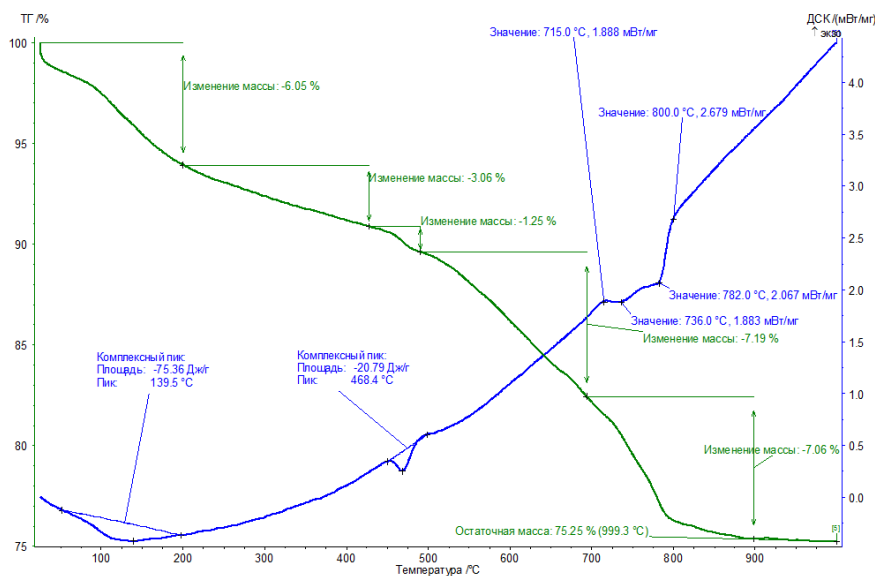


Рис. 2. Термограмма контрольного образца цементного камня

Fig. 2. Thermogram of a cement stone control sample

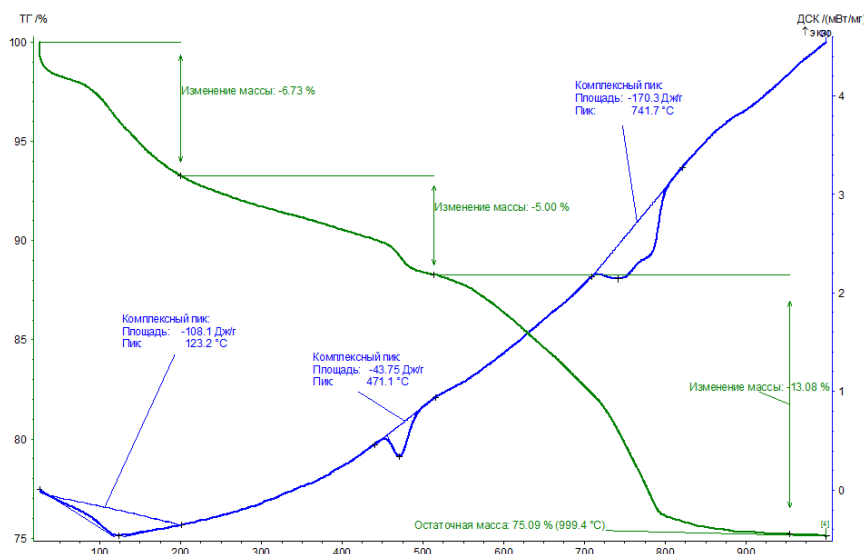


Рис. 3. Термограмма цементного камня с комплексной добавкой МСа 5 % и нано-SiO₂

Fig. 3. Thermogram of cement stone with a complex additive of МСа 5 % and nano-SiO₂

Методом ТГ и ДСК установлено, что на термограммах контрольного цементного камня и с комплексной добавкой эндоэффекты при температурах 468–471 °C, соответствующие диссоциации гидроксида кальция – портландита, а также дегидратации образующихся гидросиликатов кальция [28], существенно различаются по площади. На термограмме цементного камня с комплексной добавкой площадь пика в два раза больше, что может быть связано с наложением термоэффектов дегидратации дополнительно образовавшихся гидросиликатов при взаимодействии активной добавки нано-SiO₂.

На рис. 4 представлены рентгенограммы исследуемых образцов.

Сравнение рентгенограмм контрольного и модифицированного образцов подтверждает возможность образования новых кристаллических фаз в цементном камне в присутствии активных добавок. С введением комплексной добавки на основе нанодиоксида кремния и микрокальцита в гидратированном цементе идентифицируются дополнительные пики низкоосновных гидросиликатов кальция, сходных по структуре с афвиллитом C₃S₂H₃ (d/n=0,192 нм), и тоберморитоподобных соединений C₅S₆H₅ (d/n=0,302; 0,334;

0,261 нм), гидрокарбосиликатов кальция ($d/n=0,168$ нм), что обеспечивает повышение прочности цементного камня. Интенсивность пиков $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ($d/n=0,262$ нм) в модифицированном цементном камне снижается по сравнению с контрольным образцом вследствие взаимодействия с модифицирующими добавками с обра-

зованием дополнительных количеств кристаллогидратов.

Для подтверждения полученных результатов влияния добавок на формирование структуры цементного камня проведен электронно-микроскопический анализ образцов (рис. 5, 6).

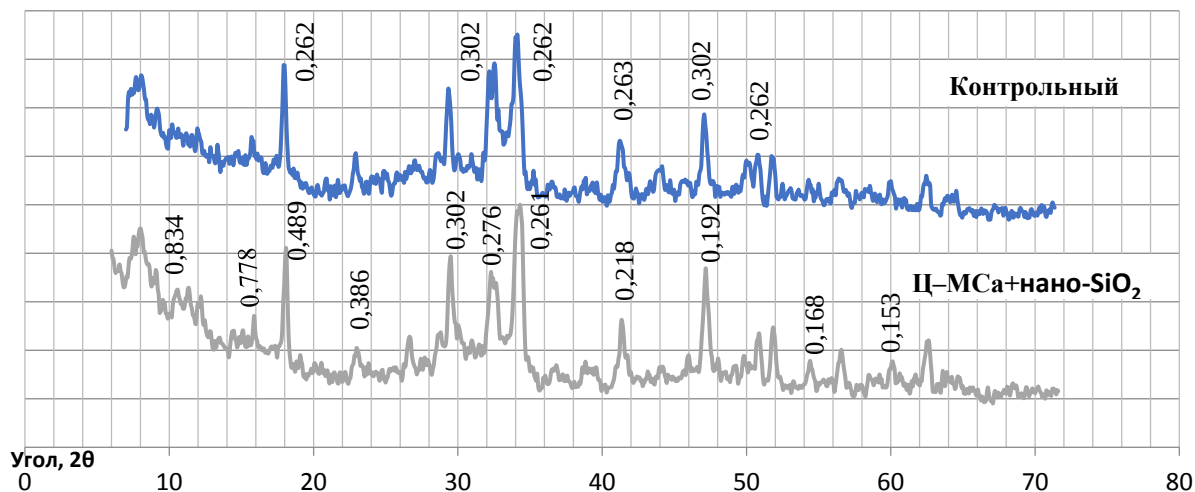


Рис. 4. Рентгенограмма цементного камня, контрольного и модифицированного добавкой МСа 5 % и нано-SiO₂

Fig. 4. Radiograph of cement stone, control and modified with MСa 5 % and nano-SiO₂

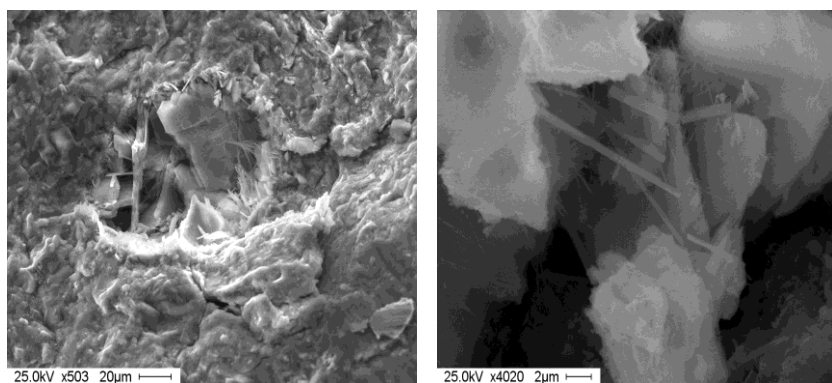


Рис. 5. Электронно-микроскопический снимок контрольного образца цементного камня

Fig. 5. Electron microscopic image of a cement stone control sample

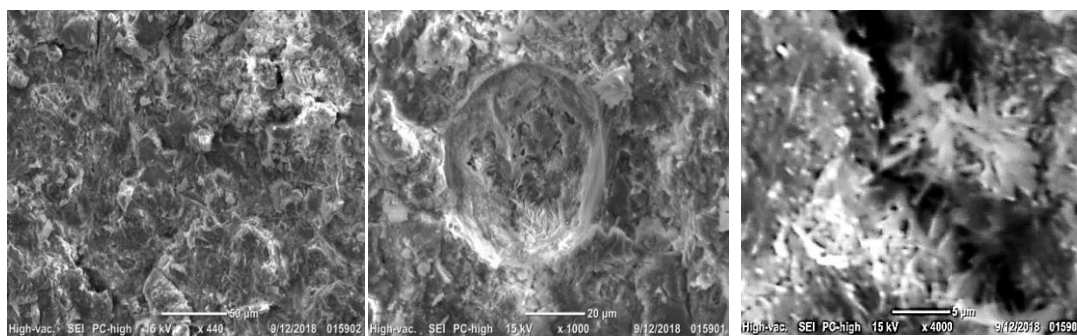


Рис. 6. Электронно-микроскопический снимок цементного камня, модифицированного комплексной добавкой МСа 5 % и нано-SiO₂ на сколе образца и в поровом пространстве

Fig. 6. Electron microscopic image of a cement stone modified with a complex additive of MСa 5 % and nano-SiO₂ on a sample chip and in pore space

Анализ данных на снимках показывает, что введение комплексной добавки МСа 5 % нано-SiO₂ в цементную матрицу обеспечивает образование допол-

нительных количеств низкоосновных гидросиликатов кальция, стабильных высокоосновных гидросульфаталюминатов кальция с разросшейся игольчатой

структурой, затягивающей поры. Отмечается более плотная структура модифицированного цементного камня. В модифицированном цементном камне крупные пластинчатые кристаллы $\text{Ca}(\text{OH})_2$ заменяются большим количеством гидросиликатов и гидрокарбосиликатов кальция, которые уплотняют и упрочняют структуру цементного камня.

Для определения тепловых эффектов при гидратации цемента были проведены исследования по установлению разницы между тепловыделением контрольного цемента и модифицированного вяжущего при постоянной температуре 20°C . График изменения теплового потока для исследуемых образцов представлен на рис. 7.

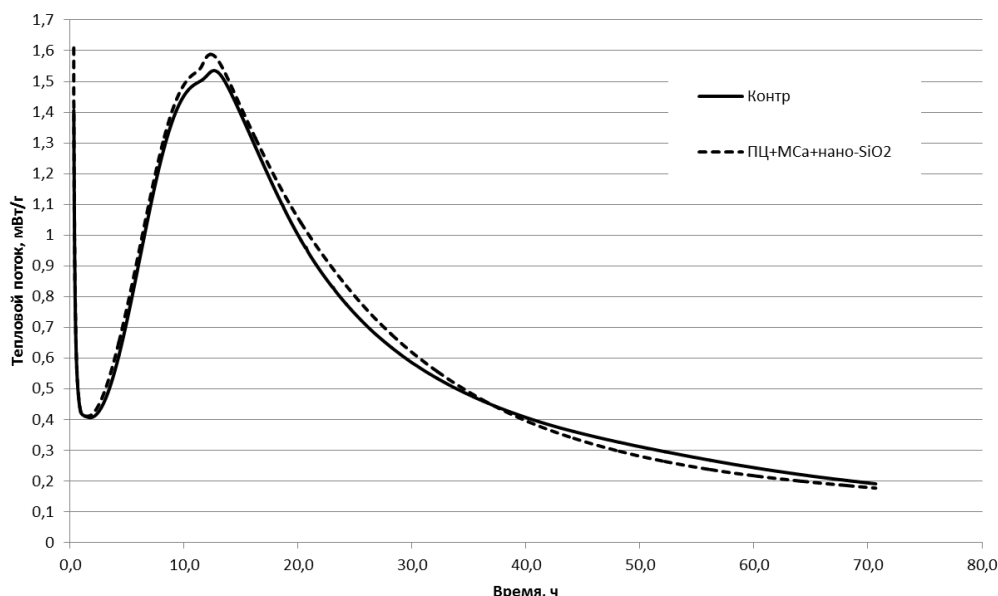


Рис. 7. Изменение теплового потока контрольного состава и состава, модифицированного комплексной добавкой МСа 5 % и нано-SiO₂

Fig. 7. Change in the heat flux of the control composition and the composition modified by the complex additive МСа 5 % and nano-SiO₂

Данные графика показывают, что тепловой поток развивался в соответствии с тремя этапами (резкий мгновенный пик вначале измерений следует исключить). На первом этапе выделяемое тепло незначительно (инкубационный период). За ним следует период ускорения, который указывает на образование новых гидратов. Период замедления является результатом диффузии воды и ионов через слои гидратов, толщина которых возрастает. При гидратации модифицированного цементного вяжущего на ранних стадиях тепловыделение выше, чем у контрольного состава. Это может быть связано с присутствием добавки нано-SiO₂, которая активизирует процессы гидратации цементного вяжущего с зарождением низкоосновных гидросиликатов кальция.

В работе исследовались возможности применения модифицированного цемента в композиционном материале на примере растворных строительных смесей. Для установления рациональных составов цементно-песчаных растворов с комплексными модифицирующими добавками и получения сухих строительных смесей с заданными свойствами готовились цементно-песчаные растворы, контрольный и модифицированный, с нормальной консистенцией. Составы исследуемых цементно-песчаных растворов представлены в табл. 4.

Для установления влияния комплексных модифицирующих добавок на прочностные характеристики растворных смесей были проведены испытания це-

ментно-песчаных образцов-балочек на изгиб и на сжатие (рис. 8).

Таблица 4. Составы исследуемых цементно-песчаных растворов

Table 4. Compositions of the studied cement-sand mortars

№ состава Composition no.	ПЦ Portland cement	Песок Sand	МСa	Нано-SiO ₂ Nano-SiO ₂	В/Ц W/C
	%				
Контрольный Control	25	75	–	–	0,5
Модиф. 1 Modified 1	25	70	5	0,03	0,475
Модиф. 2 Modified 2	20	75	5	0,03	0,475

ВЦ – Водоцементное отношение; WC – water/cement ratio.

Из представленных диаграмм видно, что комплексная добавка повышает прочность цементного камня на всех сроках твердения (7, 28 суток), по сравнению с контрольным образцом. При введении комплексной добавки 5 % микрокальцита и 0,03 % нано-SiO₂ к 28 суткам твердения прочность цементного камня превышает прочность контрольного состава на изгиб на 70 %, на сжатие на 63 %. У состава 2, со снижением расхода цементного вяжущего на 5 %, к 28 суткам прирост прочности на изгиб составляет 40 %, на сжатие 36 % по сравнению с контрольным.

Таблица 5. Рецепт ремонтной сухой строительной смеси

Table 5. Recipe for repair dry mortar

Материалы Materials	Расход на тонну, кг Consumption per ton, kg
Портландцемент Portland cement	243,75
Песок/Sand 0,63–1,25	45
Песок/Sand 0,315–0,63	303,75
Песок/Sand 0,16–0,315	401,25
Микрокальцит Microcalcite	12,25
Нано-SiO ₂ /Nano-SiO ₂	0,075
Всего/Total	1000,00

На основании проведённых исследований предложены составы сухих строительных смесей с разработанной комплексной добавкой (МСа 5 % и нано-SiO₂).

В табл. 7 представлены эксплуатационные свойства сухих строительных смесей предложенных со-

ставов по ГОСТ 31357-2013 «Смеси сухие строительные на цементном вяжущем. Общие технические условия».

Таблица 6. Рецепт кладочной сухой строительной смеси

Table 6. Recipe for masonry dry mortar

Материалы Materials	Расход на тонну, кг Consumption per ton, kg
Портландцемент Portland cement	243,75
Песок/Sand 1,25–2,5	11,25
Песок/Sand 0,63–1,25	33,75
Песок/Sand 0,315–0,63	303,75
Песок/Sand 0,16–0,315	401,25
Микрокальцит Microcalcite	12,25
Нано-SiO ₂ /Nano-SiO ₂	0,075
Всего/Total	1000,00

Таблица 7. Основные эксплуатационные свойства растворов из предложенных сухих строительных смесей

Table 7. The main operational properties of solutions from the proposed dry building mixtures

Свойства сухих смесей Properties of dry mixes	Назначение сухих смесей/Appointment of dry mixes		Показатели по ГОСТ Indicators according to SS
	Кладочная/Masonry	Ремонтная/Repair	
Для сухой смеси/For dry mix			
Насыпная плотность, кг/м³ Bulk density, kg/m³	1348	1343	В зависимости от вида раствора Depending on the type of solution
Для растворной смеси/For mortar mix			
Подвижность, см Mobility, cm	Пк3/Pk3	Пк2/Pk2	В зависимости от назначения раствора Depending on the type of solution
Водоудерживающая способность, % Water holding capacity, %	98,2	97,8	Не менее 90 % At least 90 %
Жизнеспособность, ч/Viability, h	1,5	1,5	Не регламентируется/Not regulated
Для затвердевших растворов/For hardened solutions			
Средняя плотность, кг/м³ Average density, kg/m³	2089	2114	В зависимости от вида раствора Depending on the type of solution
Прочность на сжатие, МПа Compressive strength, MPa	34,65	38	
Прочность на изгиб, МПа Bending strength, MPa	4,8	5	

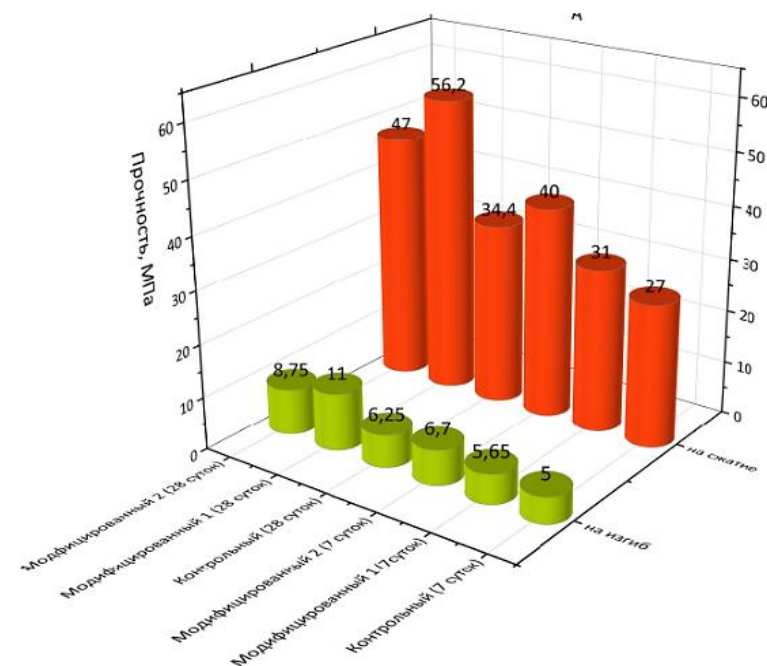


Рис. 8. Прочность на изгиб и на сжатие цементно-песчаных образцов

Fig. 8. Flexural and compressive strength of cement-sand specimens

Разработанные сухие строительные смеси с комплексными модифицирующими добавками технологически могут производиться на существующем оборудовании, используемом на предприятии сухих строительных смесей.

Заключение

В работе представлены результаты исследований влияния комплексной добавки $\text{MСа}+\text{нано-SiO}_2$ на свойства цементного камня и строительного раствора, а также возможности снижения расхода вяжущего без изменения физико-механических характеристик конечного продукта. Эффект действия добавок достигается за счет формирования структуры цементного камня на различных масштабных уровнях в соответствии с принципами полидисперсного соответствия и вещественного подобия, с использованием выбранных компонентов. Нанодиоксид кремния является инициатором самоорганизации структуры цементного камня. А при применении его в комплексе с микрокальцитом достигается синергетический эффект. Комплексная добавка позволяет получить прирост прочности на сжатие цементного камня до 51 %, а при сокращении расхода цементного вяжущего – до 47,5 %, и снизить водопотребность смеси. Предложены составы кладочных и ремонтных сухих строительных смесей с использованием модифицированного цемента, имеющие харак-

теристики, соответствующие нормативным документам. Полученные результаты исследований позволили установить возможность рационального использования карбонатных отходов (микрокальцита) горнодобывающих предприятий и кварц-содержащих вскрышных пород как компонентов комплексной модифицирующей добавки в цементные композиции, что позволит существенно снизить нагрузку на сырьевую базу производства строительных материалов и внести вклад в решение экологических проблем.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Национального исследовательского Московского государственного строительного университета в рамках конкурса 2023 года на проведение фундаментальных и прикладных исследований (НИР/НИОКР) научными коллективами организаций-членов Отраслевого консорциума «Строительство и архитектура» в целях исполнения Программы развития Национального исследовательского Московского государственного строительного университета на 2021–2030 годы в рамках реализации Программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030».

Исследования (сканирующая электронная микроскопия, энергодисперсионная рентгеновская спектроскопия, ДТА) выполнены на оборудовании Томского регионального центра коллективного пользования Национального исследовательского Томского государственного университета.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ткач Е.В., Темирганов Р.И., Ткач С.А. Комплексное исследование модифицированного бетона на основе активированного микрокремнезема совместно с микроармирующим волокном для повышения эксплуатационных характеристик // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 5. – С. 215–226.
2. Загороднюк Л.Х., Гридчин А.М., Лесовик В.С. Тенденции развития производства сухих строительных смесей в России // Строительство и архитектура. – 2016. – № 12. – С. 6–14.
3. Scrivener K.L., Kirkpatrick R.J. Innovation in use and research on cementitious material // Cement Concrete Research. – 2008. – № 38 (2). – P. 128–136.
4. Leblanc J.L. Filled polymers: science and industrial applications. – New York: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2010. – 428 p.
5. Particulate-filled polymer composites. 2nd ed. / Ed. by R. Roth. – New York: Knovel, Rapra Technology Limited, 2008. – 560 p.
6. Alam M.A., Sherif E.-S.M., Al-Zahrani S.M. Fabrication of various epoxy coatings for offshore applications and evaluating their mechanical properties and corrosion behavior // International Journal of Electrochemical Science. – 2013. – V. 8. – № 3. – P. 3121–3131.
7. Neilsen L. Mechanical properties of polymers and composites. – NY: Marcel Dekker, inc., 1974. – 556 p.
8. Баженов Ю.М., Демьянова В.С., Калашников В.И. Модифицированные высококачественные бетоны. – М.: Изд-во Ассоциации строительных вузов, 2006. – 368 с.
9. Oshio A., Sone T., Matsui A. Properties of concrete containing mineral powders // Cement Association of Japan Review. – 1987. – P. 114–117.
10. Каприелов С.С., Кардунян Г.С. Новые модифицированные бетоны в современных сооружениях // Бетон и железобетон. Оборудование. Материалы. Технологии. – 2011. – Вып. 1. – С. 78–82.
11. Wakizaka Y., Morya S., Kawano H. Relationship between mineral assemblages of rocks and their alkali reactivities // Cement Association of Japan Review. – 1987. – P. 292–295.
12. Urukhanova L.A., Lkhasaranov S.A., Bardakhanov S.P. Build Mater // Build. Mater. – 2014. – № 8. – P. 52–55.
13. Kim H., Lee S., Moon H. Strength properties and durability aspects of high strength concrete using Korean metakaolin // Construction and Building Materials Journal. – 2007. – V. 21 (6). – P. 1229–1237.
14. Саркисов Ю.С., Асосков Ю.Ф. О некоторых путях энерго- и ресурсосбережения в производстве бетонных изделий // Вестник ТГАСУ. – 2010. – № 3. – С. 166–174.
15. Копаница Н.О., Демьяненко О.В., Куликова А.А. Комплексные добавки на основе вторичных ресурсов для модификации цементных композиций // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2023. – Т. 334. – № 1. – С. 136–144. DOI: <https://doi.org/10.18799/24131830/2023/1/4045>
16. Дворкин Л.И., Дворкин О.И. Строительные материалы из отходов промышленности. – Ростов-на-Дону: Изд-во «Феникс», 2007. – 368 с.
17. Myhre B. Microsilica in refractory castables. How does microsilica quality influence performance // UNITECR'05: 9th Biennial Worldwide congress on refractories. – Orlando, Florida, USA, 2005. – P. 191–195.
18. Kjellsen K.O., Lagerblad B. Influence of natural minerals in the filler fraction on hydration and properties of mortars. – Stockholm: Swedish Cement and Concrete Research Institute, 1995. – 41 p.
19. Filled epoxy composites based on polyfraction microcalcite / T.A. Nizina, J.A. Sokolova, A.N. Chernov, D.R. Nizina, A.I. Popova, N.S. Kanaeva // Magazine of Civil Engineering. – 2018. – V. 83 (7). – P. 83–91. DOI: 10.18720/MCE.83.8.
20. Эффективные порошковые композиции на техногенном сырье / А.Д. Толстой, И.А. Ковалева, А.П. Присяжнюк и др. // Современные строительные материалы, технологии и конструкции: материалы Международной научно-практической конференции, посвященной 95-летию ФГБОУ ВПО «ГТНТУ им. акад. М.Д. Миллионщикова». – Грозный: ФГУП «ИПК "Грозненский"», 2015. – Т. 1. – С. 406–411.
21. Демьяненко О.В., Куликова А.А. Эффективность применения микрокальцита в производстве строительных композиций на цементной основе // Молодежь, наука, технологии: новые идеи и перспективы (МНТ-2017). Избранные доклады IV Международной научной конференции студентов и молодых ученых. – Томск: Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2017. – С. 39–41.

22. Куликова А.А., Сухопарова В.Ю., Жеребилов И.И. Влияние минеральных дисперсных компонентов на свойства цементного вяжущего // Избранные доклады 68-й Университетской научно-технической конференции студентов и молодых ученых. – Томск: Изд-во Томского государственного архитектурно-строительного университета, 2022. – С. 78–82.
 23. Гувалов А.А., Аббасова С.И., Кузнецова Т.В. Улучшение структуры высокопрочного бетона с применением модификаторов // Строительные материалы. – 2015. – № 12. – С. 78–80.
 24. Influence of activation methods on the structural and technological characteristics of nanomodified cement compositions / N.O. Kopanitsa, O.V. Demyanenko, A.A. Kulikova, S.V. Samchenko, I.V. Kozlova, N.A. Lukyanova // Nanotechnologies in Construction. – 2022; – V. 14 (6). – P. 481–492. URL: <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2022-14-6-481-492> (дата обращения 15.06.2023).
 25. Куликова А.А., Демьяненко О.В., Копаница Н.О. Влияние нанодиоксида кремния на свойства цементного камня // Качество. Технологии. Инновации: Материалы III Международной научно-практической конференции. – Новосибирск: НГАСУ (Сибстрин), 2020. – С. 23–28.
 26. Куликова, А.А., Демьяненко О.В. Модифицирующие добавки на основе наномодификаторов в производстве строительных материалов // Перспективы развития фундаментальных наук: сборник трудов XVIII Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Т. 6. Строительство и архитектура. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2021. – С. 53–55.
 27. Космачев П.В. Получение наноразмерного диоксида кремния плазменно-дуговым методом из высококремнеземистого природного сырья: дис. канд. техн. наук. – Томск, 2018. – 141 с.
 28. Макарова И.А., Лохова Н.А. Физико-химические методы исследования строительных материалов. 2-е изд. – Братск: Изд-во БрГУ, 2011. – 139 с.
- Поступила: 27.06.2023 г.
Прошла рецензирование: 07.07.2023 г.

Информация об авторах

Копаница Н.О., доктор технических наук, профессор кафедры строительных материалов и технологий Томского государственного архитектурно-строительного университета.

Демьяненко О.В., кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры строительных материалов и технологий Томского государственного архитектурно-строительного университета.

Куликова А.А., аспирант кафедры строительных материалов и технологий Томского государственного архитектурно-строительного университета.

Ткач Е.В., доктор технических наук, профессор кафедры строительного материаловедения Московского государственного строительного университета.

Шестаков Н.И., кандидат технических наук, доцент кафедры градостроительства Московского государственного строительного университета.

Степина И.В., кандидат технических наук, доцент кафедры строительного материаловедения Московского государственного строительного университета.

UDC 691.54

SECONDARY RESOURCES IN PRODUCTION OF COMPOSITE BUILDING MATERIALS BASED ON CEMENT

Natalya O. Kopanitsa¹,
kopanitsa@mail.ru

Olga V. Demyanenko¹,
demyanenko.olga.v@gmail.com

Anzhelika A. Kulikova¹,
lika.panda.19@gmail.com

Evgenia V. Tkach²,
ev_tkach@mail.ru

Nikolai I. Shestakov²,
nik.shestakov.1990@mail.ru

Irina V. Stepina²,
stepinaiv@mgsu.ru

¹ Tomsk State University of Architecture and Building,
2, Solyanaya square, Tomsk, 634003, Russia.

² Moscow State University of Civil Engineering,
26, Yaroslavskoe highway, Moscow, 129337, Russia.

The relevance of the research is caused by the importance of the problem of rational use of natural resources in production of composite building materials. The possibility of partial replacement of natural non-renewable raw materials used in the production of multi-ton concrete and mortar mixtures based on cement with secondary products from the production of various industries will solve the problems of: resource saving, energy consumption and ecology. The construction industry is the largest consumer of by-products of mining enterprises: overburden and waste from mining and processing enterprises, which is hundreds of millions of tons per year. The most studied are the issues related to their use as fine and coarse aggregates in concrete and mortar mixtures for various purposes. The expansion of the possibility of using secondary products of mining enterprises in the production of composite building materials is associated with the production of active mineral additives, fillers in concrete and mortar mixtures, as well as energetically active nanomodifiers. The use of by-products of different chemical composition and dispersion makes it possible to control the processes of structure formation and hardening of composite materials based on cement and to obtain composite materials with the required performance properties.

The main aim of the research is to scientifically substantiate and investigate the possibility of using waste from mining enterprises as components in concrete and mortar mixtures based on cement.

Objects: modifying additives based on secondary products; composite materials with enhanced performance properties.

Methods: determination of the mobility of mixtures, normal density, hardening time, flexural and compressive strength according to SS; thermal analysis; electron microscopy, x-ray phase analysis, colorimetry.

Results. The paper introduces the results of studies necessary for scientific substantiation, development and implementation in the construction industry of the technology for production of building mortar mixtures obtained using secondary products of mining enterprises as well as the comparative results of studies on the effect of a complex additive of microcalcite and nano-SiO₂ on the properties of cement systems. It is shown that the introduction of a complex additive increases the compressive strength of cement stone, reduces the consumption of cement without reducing its standard characteristics and improves the performance properties of concrete.

Key words:

Binder, cement compositions, microcalcite, nanomodifying additives, by-products of manufacturing.

The study was financially supported by National Research Moscow State University of Civil Engineering as part of the 2023 competition for fundamental and applied research (R&D) by research teams of organizations that are members of the Industry Consortium «Construction and Architecture» in order to implement the Program development of National Research Moscow State University of Civil Engineering for 2021–2030 as part of the implementation of the Strategic Academic Leadership Program «Priority 2030».

The studies (scanning electron microscopy, energy-dispersive X-ray spectroscopy, DTA) were carried out using the equipment of the Tomsk Regional Center for Collective Use of the National Research Tomsk State University.

REFERENCES

1. Tkach E.V., Temirkanov R.I., Tkach S.A. Comprehensive study of modified concrete based on activated microsilica together with micro-reinforcing fiber to improve performance. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 5, pp. 215–226. In Rus.
2. Zagorodnyuk L.H., Gridchin A.M., Lesovik V.S. Tendentsii razvitiya proizvodstva sukhikh stroitelnykh smesey v Rossii

- [Trends in the development of the production of dry building mixtures in Russia]. *Stroitelstvo i arkhitektura*, 2016, no. 12, pp. 6–14.
3. Scrivener K.L., Kirkpatrick R.J. Innovation in use and research on cementitious material. *Cement Concrete Research*, 2008, no. 38 (2), pp. 128–136.
 4. Leblanc J.L. *Filled polymers: science and industrial applications*. New York, CRC Press, Taylor & Francis Group, 2010. 428 p.
 5. *Particulate-filled polymer composites*. 2nd ed. Ed. by R. Rother. New York, Knovel, Rapra Technology Limited, 2008. 560 p.
 6. Alam M.A., Sherif E.-S.M., Al-Zahrani S.M. Fabrication of various epoxy coatings for offshore applications and evaluating their mechanical properties and corrosion behavior. *International Journal of Electrochemical Science*, 2013, vol. 8, no. 3, pp. 3121–3131.
 7. Neilsen L. *Mechanical properties of polymers and composites*. NY, Marcel Dekker, inc., 1974. 556 p.
 8. Bazhenov Yu.M., Demyanova V.S., Kalashnikov V.I. *Modifitsirovannye vysokokachestvennyye betony* [Modified high-quality concrete]. Moscow, Association of Building Universities publ., 2006. 368 p.
 9. Oshio A., Sone T., Matsui A. Properties of concrete containing mineral powders. *Cement Association of Japan Review*, 1987, pp. 114–117.
 10. Kaprielov S.S., Kardumyan G.S. Novye modifitsirovannye betony v sovremennykh sooruzheniyakh [New modified concretes in modern structures]. *Beton i zhelezobeton. Oborudovanie. Materialy. Tekhnologii*, 2011, no. 1, pp. 78–82.
 11. Wakizaka Y., Morya S., Kawano H. Relationship between mineral assemblages of rocks and their alkali reactivities. *Cement Association of Japan Review*, 1987, pp. 292–295.
 12. Urukhanova L.A., Lkhasaranov S.A., Bardakhanov S.P. Build Mater. *Build. Mater*, 2014, no. 8, pp. 52–55.
 13. Kim H., Lee S., Moon H. Strength properties and durability aspects of high strength concrete using Korean metakaolin. *Construction and Building Materials Journal*, 2007, vol. 21 (6), pp. 1229–1237.
 14. Sarkisov Yu.S. On some ways of energy and resource saving in the production of concrete products. *Vestnik TGASU*, 2010, no. 3, pp. 166–174. In Rus.
 15. Kopanitsa N.O., Demyanenko O.V., Kulikova A.A. Complex additives based on secondary resources for the modification of cement compositions. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2023, vol. 334, no. 1, pp. 136–144. DOI: <https://doi.org/10.18799/24131830/2023/1/4045>
 16. Dvorkin L.I., Dvorkin O.L. *Stroitelnye materialy iz otkhodov promyshlennosti* [Building materials from industrial waste]. Rostov-on-Don, Feniks Publ., 2007. 368 p.
 17. Myhre B. Microsilica in refractory castables. How does microsilica quality influence performance. *UNITECR'05: 9th Biennial Worldwide congress on refractories*. Orlando, Florida, USA, 2005. pp. 191–195.
 18. Kjellsen K.O., Lagerblad B. *Influence of natural minerals in the filler fraction on hydration and properties of mortars*. Stockholm, Swedish Cement and Concrete Research Institute, 1995. 41 p.
 19. Nizina T.A., Sokolova J.A., Chernov A.N., Nizin D.R., Popova A.I., Kanaeva N.S. Filled epoxy composites based on polyfraction microcalcite. *Magazine of Civil Engineering*, 2018, vol. 83 (7), pp. 83–91. DOI: 10.18720/MCE.83.8.
 20. Tolstoy A.D., Kovaleva I.A., Prisyazhnyuk A.P. Effektivnye poroshkovyye kompozitsii na tekhnogennom syrye [Effective powder compositions based on technogenic raw materials]. *Sovremennyye stroitelnye materialy, tekhnologii i konstruksii. Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyashchennoy 95-letiyu FGBOU VPO «GGNTU im. akad. M.D. Millionshchikova»* [Modern building materials, technologies and structures. Materials of the International scientific and practical conference dedicated to the 95th anniversary of the FGBOU VPO «GGNTU named after I.I. acad. M. D. Millionshchikov»]. Grozny, IPK «Groznskiy Publ., 2015. Vol. 1, pp. 406–411.
 21. Demyanenko O.V., Kulikova A.A. Effektivnost primeneniya mikrokaltsita v proizvodstve stroitelnykh kompozitsiy na tsementnoy osnove [Efficiency of using microcalcite in the production of building compositions based on cement]. *Molodezh, nauka, tekhnologii: novye idei i perspektivy (MNT-2017). Izbrannyye doklady IV Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii studentov i molodykh uchenykh* [Youth, Science, Technology: New Ideas and Perspectives (MNT-2017). Selected reports of the IV International scientific conference of students and young scientists]. Tomsk, Tomsk State University of Architecture and Building Publ., 2017. pp. 39–41.
 22. Kulikova A.A., Sukhoparova V.Yu., Zherebilov I.I. Vliyanie mineralnykh dispersnykh komponentov na svoystva tsementnogo vyazhushchego [Influence of mineral dispersed components on the properties of cement binder]. *Izbrannyye doklady 68-y Universitetskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii studentov i molodykh uchenykh* [Selected reports of the 68th University Scientific and Technical Conference of Students and Young Scientists]. Tomsk, Tomsk State University of Architecture and Building Publ., 2022. pp. 78–82.
 23. Guvalov A.A., Abbasova S.I., Kuznetsova T.V. Improving the structure of high-strength concrete using modifiers. *Stroitelnye materialy*, 2015, no. 12, pp. 78–80. In Rus.
 24. Kopanitsa N.O., Demyanenko O.V., Kulikova A.A., Samchenko S.V., Kozlova I.V., Lukyanova N.A. Influence of activation methods on the structural and technological characteristics of nanomodified cement compositions. *Nanotechnologies in Construction*, 2022, vol. 14 (6), pp. 481–492. Available at: <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2022-14-6-481-492> (accessed 15 June 2023).
 25. Kulikova A.A., Demyanenko O.V., Kopanitsa N.O. Vliyanie nanodioksida kremniya na svoystva tsementnogo kamnya [Influence of nanodioxide silicon on the properties of cement stone]. *Materialy III Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Kachestvo. Tekhnologii. Innovatsii* [Proceedings of the III International Scientific and Practical Conference. Quality. Technologies. Innovations]. Novosibirsk, NGASU (Sibstrin) Publ., 2020. pp. 23–28.
 26. Kulikova A.A., Demyanenko O.V. Modifitsiruyushchie dobavki na osnove nanomodifikatorov v proizvodstve stroitelnykh materialov [Modifying additives based on nanomodifiers in the production of building materials]. *Perspektivy razvitiya fundamentalnykh nauk. Sbornik trudov XVIII Mezhdunarodnoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh. T. 6. Stroitelstvo i arkhitektura* [Prospects for the development of fundamental sciences. A collection of proceedings of the XVIII International Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists. Vol. 6. Construction and architecture]. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ. house, 2021. pp. 53–55.
 27. Kosmachev P.V. *Poluchenie nanorazmernogo dioksida kremniya plazmenno-dugovym metodom iz vysokokremnezemistogo prirodnogo syrya*. Diss. Kand. nauk [Obtaining nanosized silicon dioxide by the plasma-arc method from high-silica natural raw materials. Cand. Diss.]. Tomsk, 2018. 141 p.
 28. Makarova I.A., Lokhova N.A. *Fiziko-khimicheskie metody issledovaniya stroitelnykh materialov* [Physico-chemical methods for the study of building materials]. Bratsk, BrGU Publ., 2011. 139 p.

Received: 27 June 2023.

Reviewed: 7 July 2023.

Information about the authors

Natalya O. Kopanitsa, Dr. Sc., professor, Tomsk State University of Architecture and Building.

Olga V. Demyanenko, Cand. Sc., senior lecturer, Tomsk State University of Architecture and Building.

Anzhelika A. Kulikova, postgraduate student, Tomsk State University of Architecture and Building.

Evgenia V. Tkach, Dr. Sc., professor, Moscow State University of Civil Engineering.

Nikolai I. Shestakov, Cand. Sc., associate professor, Moscow State University of Civil Engineering.

Irina V. Stepina, Cand. Sc., associate professor, Moscow State University of Civil Engineering.

УДК 622.276

ИССЛЕДОВАНИЕ УСЛОВИЙ ОБРАЗОВАНИЯ ГАЗОГИДРАТНЫХ И АСФАЛЬТОСМОЛОПАРАФИНОВЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ПРИ ДОБЫЧЕ НЕФТИ МЕХАНИЗИРОВАННЫМ СПОСОБОМ

Коробов Григорий Юрьевич¹,
korobovgrigory@yandex.ru

Воронцов Андрей Алексеевич¹,
andrey-vorontsov98@yandex.ru

¹ Санкт-Петербургский горный университет,
Россия, 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я линия Васильевского острова, 2.

Актуальность работы обусловлена недостаточной изученностью процесса образования газовых гидратов и асфальтосмолопарафиновых отложений в скважинном пространстве. При этом свойства образованных органических отложений существенно зависят от условий протекания процесса их образования. Соответственно, более точное понимание принципов образования отложений позволяет прогнозировать рост и подбирать эффективные способы борьбы с отложениями газовых гидратов и асфальтосмолопарафиновыми отложениями. Дополнительно представленная в статье информация позволяет оценить действие основных факторов, влияющих на условия образования газовых гидратов и асфальтосмолопарафиновых отложений. При этом есть возможность выделить наиболее важные факторы, которые могут контролироваться изменением параметров работы скважинного оборудования. Данные исследования могут помочь оптимизировать подбор параметров скважинного оборудования в условиях образования органических отложений.

Цель: анализ условий образования газогидратных и асфальтосмолопарафиновых отложений в добывающей скважине; анализ результатов предшествующих работ, посвященных исследованию факторов, влияющих на процесс образования отложений газовых гидратов и асфальтосмолопарафиновых отложений в скважинном пространстве.

Объекты: факторы, влияющие на процесс образования отложения газовых гидратов и асфальтосмолопарафиновых отложений на внутренней поверхности нефтепромыслового оборудования.

Методы: выполнение литературного обзора и проработка публикаций в рецензируемых изданиях; анализ результатов предшествующих исследований, формулировка основных идей и тенденций, выявление пробелов и недостатков существующих исследований.

Результаты. Описаны основные механизмы образования газогидратных и асфальтосмолопарафиновых отложений на внутренней поверхности нефтепромыслового оборудования. Представлен обзор предшествующих исследований, посвященных анализу механизмов образования асфальтосмолопарафиновых отложений и газовых гидратов. Проведенный анализ позволил выявить пробелы и допущения в теории образования газовых гидратов и асфальтосмолопарафиновых отложений, требующих дальнейшего изучения принципов их образования. Проанализированы основные факторы, зависящие от работы скважинного оборудования, а также влияющие на образование органических отложений: термобарические условия, газосодержание, дросселирование, обводненность, молекулярные явления. Полученные факторы сведены в отдельные таблицы.

Ключевые слова:

Газовые гидраты, асфальтосмолопарафиновые отложения, установка электроцентробежного насоса, термобарические условия, факторы образования асфальтосмолопарафиновых отложений и газовых гидратов.

Введение

Самыми распространенными факторами, осложняющими разработку нефтегазоконденсатных месторождений Российской Федерации, являются: геологическая неоднородность, нетрадиционная нефть с большим содержанием парафинов, асфальтенов и смол, высокий газовый фактор на добывающих скважинах. Сложные климатические условия Крайнего Севера, где чаще всего открываются новые месторождения углеводородов, усложняют ситуацию с переохлаждением несъемного оборудования и проходящего через него флюида. Дополнительно охлаждают поток многолетнемерзлые породы (ММП), что в комплексе с суровым климатом ухудшает ситуацию с образованием газовых гидратов и асфальтосмолопарафиновых отложений (АСПО) при добыче нефти и газа [1–3].

Целью данной работы является анализ процессов, происходящих при образовании газогидратных и ас-

фальтосмолопарафиновых отложений в добывающей скважине.

Основные задачи данного исследования включают анализ литературных данных:

- строение молекул газового гидрата и обзор основных факторов, изменяющих условия образования гидратов и АСПО;
- методикам предотвращения образования органических отложений и способам борьбы с уже образовавшимися пробками из гидратов и АСПО;
- методикам повышения эффективности работы установки электроцентробежного насоса (УЭЦН) в осложненных условиях;
- основным факторам, оказывающим влияние на условия образования органических отложений в скважине, которые также зависят от работы УЭЦН;
- направлениям исследований, позволяющих устранить пробелы в научной теории образования газогидратных и асфальтосмолопарафиновых отложений.

Объектом исследования являются отложения газовых гидратов и АСПО. Предметом исследования является анализ факторов, влияющих на условия образования органических отложений.

Актуальность работы обусловлена тем, что представленная информация позволяет оценить факторы, влияющие на условия образования газовых гидратов и АСПО в скважинном пространстве. При этом есть возможность выделить наиболее важные факторы, которые могут контролироваться изменением параметров работы скважинного оборудования. Данные исследования могут помочь оптимизировать подбор параметров скважинного оборудования в условиях образования органических отложений [4]. Низкие температуры и ММП при разработке месторождений за Полярным кругом значительно способствуют отложению газовых гидратов в устьевом пространстве [5, 6]. Образование АСПО в добывающих нефтяных скважинах остается одной из самых часто встречаемых проблем при добыче нефти на месторождениях Российской Федерации. Распространение УЭЦН на месторождениях России составляет 60 % от всех методов механизированной добычи углеводородов. Их количество продолжает расти, что подтверждает логичность выбора УЭЦН в исследуемую компоновку скважины [7]. Представленные выше данные подтверждают актуальность дальнейшего исследования выбранной тематики, что позволит повысить эффективность работы УЭЦН в условиях, осложненных образованием газовых гидратов и АСПО [8].

Газовые гидраты – это соединения, разновидность клатратов, образующиеся из воды и низкомолекулярных газов (метана, этана, углекислого газа) при специфических термобарических условиях. Молекула газа попадает внутрь «клетки» из молекул воды, образуя молекулу гидрата. Образование газового гидрата происходит при определенных термобарических условиях: давление от 1 до 30 МПа, температура системы ниже 15 °С. Также необходимо достаточное количество воды в системе для образования кристаллической решетки. При отсутствии требуемых термобарических условий или при малом содержании воды в системе образование молекул гидрата невозможно [9].

Также существуют факторы, способствующие образованию отложений газового гидрата при добыче углеводородов. Повышенный газовый фактор на добывающих нефтяных скважинах, а также добыча непосредственно природного газа предполагает образование гидратных пробок в верхней части скважины [10]. Механические примеси и взвешенные кристаллы парафина могут играть роль центров кристаллизации гидратов. В ходе эксплуатации добывающих скважин было выяснено, что малодобитные по жидкости скважины с высоким газовым фактором чаще останавливаются из-за образования отложений газового гидрата в приустьевом пространстве скважины, чем скважины с большим дебитом. Также свою роль в образовании газогидратных отложений играет эффект дросселирования. Негерметичность соединений насосно-компрессорных труб (НКТ) создает условия, способствующие образованию пробок газового гид-

рата. В местах негерметичности между внутренней и внешней средой НКТ происходит перепад давлений в 2–6 МПа. Соответственно, можно отметить основные факторы, способствующие образованию кристаллогидратов в скважинном пространстве [8]:

- низкая температура потока;
- наличие зон ММП, снижающих температуру устья скважины;
- большое количество свободного газа;
- наличие частиц парафина и механических примесей, которые играют роль центров кристаллизации газовых гидратов;
- восстановление давления и снижение температуры системы при остановке скважины;
- низкий дебит при хорошей продуктивности скважины;
- эффект дросселирования из-за негерметичности труб.

АСПО откладываются на поверхностях промышленного оборудования и трубопроводов, значительно осложняя процесс добычи, транспорта и переработки нефти. В ходе многочисленных исследований были выделены обязательные условия, при которых существует опасность образования АСПО в промышленном оборудовании [11–13]:

- наличие тяжелых компонентов нефти, способных к агломерации в крупные частицы АСПО;
- выделение растворенного в нефти газа при снижении давления потока ниже давления насыщения нефти газом;
- падение температуры потока ниже температуры насыщения нефти парафиновыми углеводородами;
- срывные силы потока, зависящие от его скорости, режима и структуры, ниже сил сцепления внутри отложений.

Отложение газовых гидратов и АСПО в значительной степени снижает производительность добывающей скважины, снижая рентабельность добычи углеводородов. Агломерация газовых гидратов и АСПО в единое образование еще больше затрудняет эксплуатацию добывающей скважины. Сложность применения механизмов образования органических отложений в моделировании применения и апробации данных моделей на промыслах тормозит внедрение новых технологий для практического использования. Отсутствие полной теории образования комплексных соединений газовых гидратов и АСПО еще больше осложняет понимание процесса борьбы с ними. Таким образом, в данной работе разобраны основные способы борьбы с образованием газовых гидратов и АСПО в скважинном пространстве, представлены основные факторы, влияющие на условия образования газовых гидратов и АСПО в скважинах, оборудованных УЭЦН.

Анализ методов борьбы с газогидратными и асфальтосмолопарафиновыми отложениями

Сначала будут рассмотрены методы борьбы с газовыми гидратами. В современной практике они делятся на два вида: методы предупреждения образова-

ния гидратных отложений и методы разрушения газогидратных пробок. Оптимальным решением в реалиях нефтегазовой отрасли является именно предупреждение отложения газогидратов в скважинах. Лучшими экономическими и технологическими показателями обладают химические ингибиторы гидратообразования. Ингибиторы делят на три класса [14]:

1. Термодинамические. Данный вид ингибиторов снижает активность воды, тем самым смещая трехфазовое равновесие в сторону более низких температур. Это наиболее распространенный вид ингибиторов, применяемый в Российской Федерации. К данному виду относятся алифатические спирты, в том числе наиболее распространенный метанол, гликоли и водные растворы неорганических солей [14].
2. Кинетические. Данный вид ингибиторов обволакивает зародыши молекул газового гидрата, нарушая дальнейший рост крупных агломератов. Чаще всего данный вид ингибиторов представлен полимерными водорастворимыми соединениями [8].
3. Антиагломераторы. Данный вид ингибиторов предотвращает контакт газообразной фазы и жидкой фазы, нарушая процесс агломерации кристаллов газового гидрата. Чаще всего данные вещества представлены поверхностно-активными веществами с короткими молекулярными цепочками. При определенных условиях антиагломераторы могут как предотвращать образование газовых гидратов в потоке, так и способствовать их образованию [15].

Два последних вида ингибиторов находятся сейчас в активной стадии промышленных испытаний и в перспективе могут заменить термодинамические ингибиторы гидратообразования. Их основные преимущества – низкие концентрации и экологическая безопасность относительно термодинамических ингибиторов [8].

Методы борьбы с АСПО также делятся на методы предотвращения их образования в скважинах и методы разрушения образованных ранее пробок.

Методы предотвращения образования АСПО [7]:

- химические: диспергаторы, смачиватели, депрессаторы, модификаторы;
- физические: магнитные и ультразвуковые поля, вибрации.
- Методы разрушения асфальтосмолопарафиновых пробок:
- тепловые: промывка горячей водой или нефтью, применение пара, нагревательные элементы;
- механические: скребки, модернизированные центраторы;
- химические: растворители, ингибиторы в высоких концентрациях.

Тепловые методы показывают наилучшие результаты по устранению и предотвращению образования АСПО в скважинах. Недостатками данных методов являются их высокая энергоемкость, электро- и пожароопасность, ненадежность и низкая эффективность применяемых технологий. В данной ситуации химические ингибиторы показывают наибольшую

технологическую и экономическую эффективность в борьбе с образованием АСПО [16].

Обзор современной литературы по методам борьбы с органическими отложениями показал основные тенденции в исследованиях по данной тематике. В Российской Федерации активно проводятся промышленные испытания ингибиторов гидратообразования на основе метанола. Исследователи из Китая достигли значительных успехов в изучении кинетики и молекулярных явлений образования газовых гидратов [4, 17, 18]. Лабораторная база в Китае по изучению газовых гидратов в свободном объеме является самой лучшей и развитой. Европейскими научными коллективами были представлены обширные литературные обзоры по условиям образования как газовых гидратов, так и АСПО [14, 19]. Таким образом, в ходе предварительного обзора литературы по рассматриваемой проблеме образования газовых гидратов и АСПО в добывающих скважинах были обнаружены основные направления, требующие более подробного изучения с целью снижения количества пробелов в существующей теории образования органических отложений.

Термические условия в добывающей скважине

Лучший способ борьбы с органическими отложениями – соблюдение условий добычи, при которых отложения газовых гидратов и АСПО не образуются. Основными параметрами, влияющими на образование органических отложений, являются давление и температура системы [4, 8].

Так, в исследовании [20] была представлена методика определения температуры потока внутри скважины. Данная модель основывается на дифференциальных уравнениях теплопроводности, в которых учитывается коэффициент теплопередачи между окружающими породами и потоком в скважине. Значение коэффициента получают с помощью промышленных данных. В ходе экспериментов была подтверждена высокая сходимость полученной термограммы скважины с промышленными данными. В работах [21, 22] рассматривается конвективный теплообмен для вертикального газожидкостного двухфазного потока углеводородов. Данный поток имитирует движение нефти и газа в добывающей скважине. В ходе лабораторных экспериментов были выявлены зависимости теплопередачи от скорости смеси и структуры потока. Теоретические исследования заключались в разработке комплексной механистической модели теплообмена. Данная модель учитывает характер течения потока: пузырьковая, глобуловая, кольцевая структура. Разработанная модель способна предсказать структуру потока, а далее на основе полученной структуры подсчитать гидродинамику и теплопередачу потока. Результаты сравнения модели и реальных данных показали, что представленная модель рассчитывает коэффициент теплопередачи в пределах 20, 30 и 25 % погрешности для пузырькового, кольцевого и глобулового потока.

Учет таких параметров ММП, как скрытая теплота плавления, эффект подтаивания ММП, миграция воды из зон вблизи скважины к дальним областям,

температурный градиент, позволил авторам работы [23] представить новую тепловую модель добывающей скважины. Промысловые испытания модели показали высокую сходимость результатов вычисления с реальными данными.

Таким образом, точное определение термобарических условий внутри скважины позволит лучше предсказывать условия образования газовых гидратов и АСПО, что в свою очередь позволит вести бесперебойную добычу углеводородов без выпадения органических отложений в оборудовании.

Условия образования газовых гидратов

Сложность процесса образования кристаллогидратов затрудняет создание одной общей теории гидратообразования, которая смогла бы учесть множество факторов, оказывающих влияние на данный процесс. В исследованиях [9, 14, 19] представлены обширные сведения о кинетической и термодинамической составляющей образования газовых гидратов. Обширные запасы газовых гидратов и образования газогидратных отложений при добыче и транспорте углеводородов стимулируют исследования процесса образования и диссоциации газовых гидратов [24–26]. В табл. 1 представлены направления исследований образования газовых гидратов.

В работах [17, 27] показано, что динамика потока оказывает значительное влияние на гидратообразова-

ние в движущемся потоке с точки зрения таких факторов, как разрушение, коалесценция, деформация пузырьков газа, их столкновение с вихрями потока смеси и между собой. Экспериментально была изучена модель массопереноса с учетом представленных выше параметров. Было установлено, что наибольший эффект на гидратообразование оказывает деформация пузырьков газа, увеличивается площадь поверхности раздела фаз, таким образом улучшается массоперенос и усиливается процесс гидратообразования. Столкновение пузырьков между собой и с вихрями потока также положительно сказывается на массопереносе между фазами. В работе [28] было установлено, что в частично дисперсной системе (вода не полностью перемешана с нефтью) газогидратные отложения образуются быстрее, чем в полностью дисперсной системе (эмульсия воды и нефти), что представлено на рис. 1. В частично дисперсной системе наблюдаются значительные скачки давления, что прежде всего свидетельствует об активном образовании гидратных отложений, также в такой системе гидратная пленка на стенках оборудования образуется намного быстрее, что способствует накоплению молекул гидрата на оборудовании. Данные исследования помогут понять влияние работы УЭЦН, которая значительно диспергирует поток и изменяет его режим, на условия образования гидратов.

Таблица 1. Направления исследования газовых гидратов (материал автора)

Table 1. Gas hydrates research areas (author's material)

Исследования термобарических условий фазового равновесия Studies of phase equilibrium thermobaric conditions	На стыке двух направлений исследований At the intersection of two areas of research	Исследование кинетики образования газового гидрата Study of gas hydrate formation kinetics
Оценка распространения природных запасов газовых гидратов Assessment of natural gas hydrates reserves distribution	Разделение и очистка газов Gas separation and purification	Обеспечение подъема пластового флюида в насосно-компрессорных трубах Providing fluid lift in tubing
Подсчет извлекаемых запасов газа газовых гидратов Calculation of recoverable gas hydrate reserves	Технологии очистки воды Water treatment technologies	Предотвращение закупорки узловых элементов промыслового оборудования Clogging prevention of field equipment nodal elements
Создание гидратов в качестве носителей энергии Creation of hydrates as energy carriers	Захват и хранение углекислого газа Carbon dioxide capture and storage	Предотвращение гидратных отложений в промысловых и магистральных трубопроводах Prevention of hydrate deposits in field and trunk pipelines
Выявление зон образования гидрата Detection of hydrate formation zones	Гидратообразование в поровом пространстве Hydrate formation in the pore space	

В работах [29, 30] изучаются механизм образования газовых гидратов. Для проведения исследований в лаборатории применялись рамановская спектроскопия, дифракция рентгеновских лучей, микроскопическое наблюдение и дифференциальная сканирующая калориметрия. Авторами был сделан вывод, что в начале образования гидратных отложений молекулы гидрата аморфны, а уже затем приобретают кристаллографическую структуру. В исследовании [19] представлена принципиальная схема образования молекул гидратов. Для этого авторами работы использовалось молекулярное моделирование, лабораторные исследования с помощью рентгеновской и нейтронной дифракции. Эта общая информация полезна для многих исследований, проводимых по газовым гидратам.

Схема образования зародыша газового гидрата представлена на рис. 2.

Одной из основ изучения гидратообразования является анализ кристаллизации в статических условиях, приближенных к реальным [31]. В подобных исследованиях используются автоклавы высокого давления в сочетании с видеосъемкой. Такой набор оборудования позволяет зафиксировать начальный момент образования зародыша гидрата, его дальнейшую агломерацию. При меньших давлениях газовые гидраты образуются в основном на стенках труб и оборудования. При высоких давлениях начинается процесс зародышеобразования в свободном объеме в центрах кристаллизации.

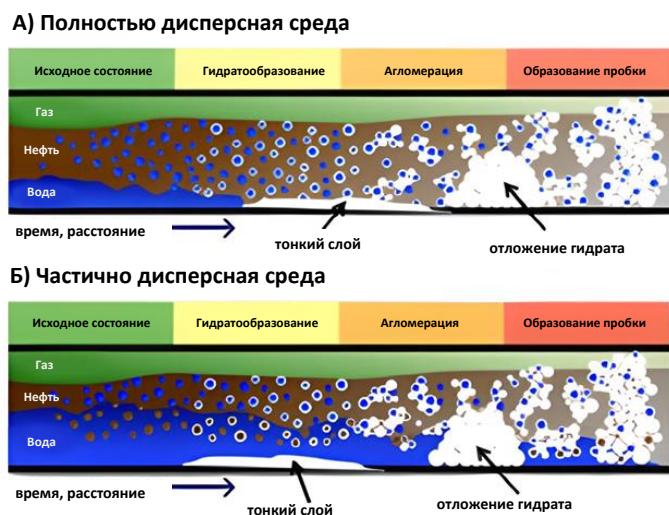


Рис. 1. Схема образования гидратных отложений в дисперсной системе (а) и в частично дисперсной системе (б) [28]
Fig. 1. Scheme of hydrate deposits formation in fully dispersed medium (a) and in partially dispersed medium (b) [28]

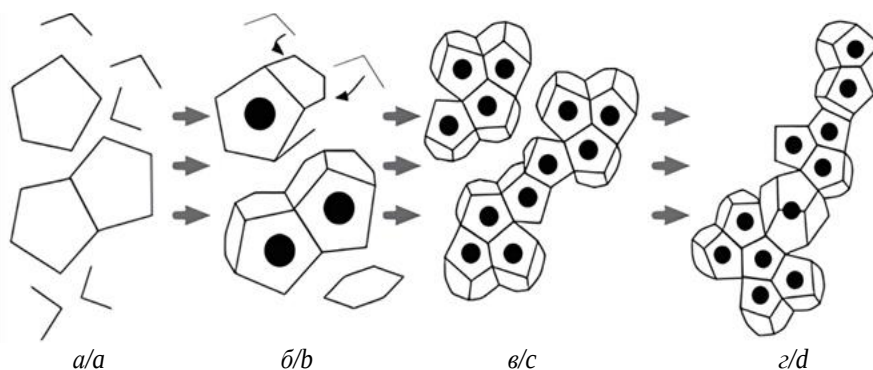


Рис. 2. Схема образования зародыша газового гидрата: (а) начальное состояние (термобарические условия подходят для образования газогидрата, но молекула газа не растворена в воде); (б) нестабильные кластеры (растворение газа в воде и образование начальных газогидратных кластеров); (в) аггломерация (нестабильные кластеры соединяются друг с другом); (г) нуклеация газогидратов (образование кристаллов гидрата из достигших критической массы аггломератов) [19]
Fig. 2. Scheme of gas hydrate nucleation: (a) initial state (thermobaric conditions are suitable for gas hydrate formation, but a gas molecule is not dissolved in water); (b) unstable clusters (gas dissolution in water and initial gas hydrate clusters formation); (c) agglomeration (unstable clusters join together); (d) gas hydrate nucleation (hydrate crystals formation from agglomerates that reached critical mass) [19]

В результате исследования [32] были сделаны заключения об особенностях гидратообразования при различном содержании воды в потоке:

1. При высокой обводненности зародышеобразование гидратов происходит на разделе фаз газ–вода. Время аггломерации газогидратов значительно уменьшается.
2. При средней обводненности зародышеобразование гидратов происходит на разделе фаз нефть–вода. Гидратных отложений образуется меньше, также снижается и скорость гидратообразования.
3. В системах с низкой обводненностью плотность и толщина отложений газогидратов снижается.

Также необходимо изучение образования кристаллогидратов в условиях, приближенных к промышленным. Так, в работе [33] предлагается наглядная модель определения области образования гидрата метана. Для этого сравнивается поле температуры и давления в дренажной линии с кривой фазового равнове-

сия газогидратов. Также учитывается созданный насосом пузырьковый режим течения.

В статьях [18, 34] представлена модернизация газогидратной модели Чен-Го, которая способна с высокой точностью прогнозировать условия образования газовых гидратов. Применение данной модели на практике позволяет снизить среднее абсолютное отклонение результатов моделирования от реальных данных на 20,95 % по сравнению с традиционными моделями гидратообразования. Другая модель гидратообразования уже основывается на балансе сил между частицами газового гидрата [35]. Схема модели работает так, что аггломерация гидратных отложений на стенках происходит при недостаточных сдвиговых силах, движущийся поток не способен нести в себе частицы гидратов и расслоить уже существующие отложения. Также было установлено, что при более высоких скоростях потока отложения в большей степени образуются в общей массе потока в центрах кри-

сталлизации. При низких скоростях потока доминирует пристеночное отложение гидратов.

Большой вклад в исследование условий образования газовых гидратов внесли наработки Wang Zhiyuan [36]. В работе [37] рассматривается модернизация тепловой модели потока с преобладанием газа, где есть условия образования гидратных отложений. Экзотермический процесс образования молекул гидратов может приводить к нагреву стенки трубы при образовании самих отложений. Однако уже при росте толщины слоя гидратов колебания температуры замедляются, так как сами отложения плохо проводят тепло. Результаты расчетов хорошо согласуются с экспериментальными данными, отклонения не превышают 6 %. Данные исследования дополняют общую термодинамическую модель гидратообразования. В исследованиях [38, 39] исследуется теория образования гидратных отложений в НКТ добывающих скважин. Для построения общей модели поведения газовых гидратов в НКТ используется синергия многофазного потока и условия образования и отложения газогидратов. Точность совместной модели подтверждается полевыми и литературными данными. Основной вклад в отложения гидратов делает жидкая пленка воды, задерживающаяся на стенках НКТ. Также повышение обводненности продукции способствует образованию гидратов уже из точек зародышеобразования в самом потоке, увеличивая риск полной блокировки НКТ гидратами. Для усреднённых параметров добывающих скважин было подсчитано, что полная блокировка сечения НКТ произойдет за 30 часов, а не за короткий промежуток времени. Это позволило в работе [39] предложить новую концепцию HBFW (HydrateBlockageFreeWindow). Данная концепция заключается в отслеживании термобарических условий нестабильности газового гидрата и снижении расхода ингибитора в связи с отсутствием его необходимости. Благодаря данной технологии

можно оптимизировать процесс подачи ингибитора, снизив его расход. Данная технология позволяет добиться необходимого размера сечения НКТ для обеспечения потока углеводородов.

Современные технологии искусственного интеллекта также нашли свое применение в прогнозировании условий образования газовых гидратов. В работах [40, 41] рассматривается возможность внедрения машинного обучения для повышения точности моделирования условий образования кристаллогидратов. Это очень перспективное направление, ведь правильно настроенный искусственный интеллект смог с большой точностью и оперативностью реагировать на изменения термобарических условий в скважине и предупреждать об угрозе образования газогидратной пробки.

Как отмечалось ранее, совместное образование отложений газового гидрата и АСПО создает значительные трудности при добыче углеводородов механизованным способом [42, 43]. В работе [4] представлена обновленная схема образования гидратных зародышей в присутствии АСПО и поверхностно-активных веществ (ПАВ), роль которых могут играть асфальтены. Данная схема представлена на рис. 3. В ходе исследований были получены следующие результаты:

1. Зародышеобразование гидратных молекул замедляется в присутствии АСПО или ПАВ.
2. Молекулы АСПО затрудняют массоперенос между молекулами газового гидрата.
3. Объем отложений гидрата увеличивается в присутствии АСПО без ПАВ. Это связано с внедрением в структуру агломератов гидрата молекул АСПО, что также усложняет дальнейший процесс разрушения таких соединений.

Таким образом, необходимо более подробно исследовать физические и химические аспекты образования газогидратов, их взаимное влияние на работу скважинного оборудования.

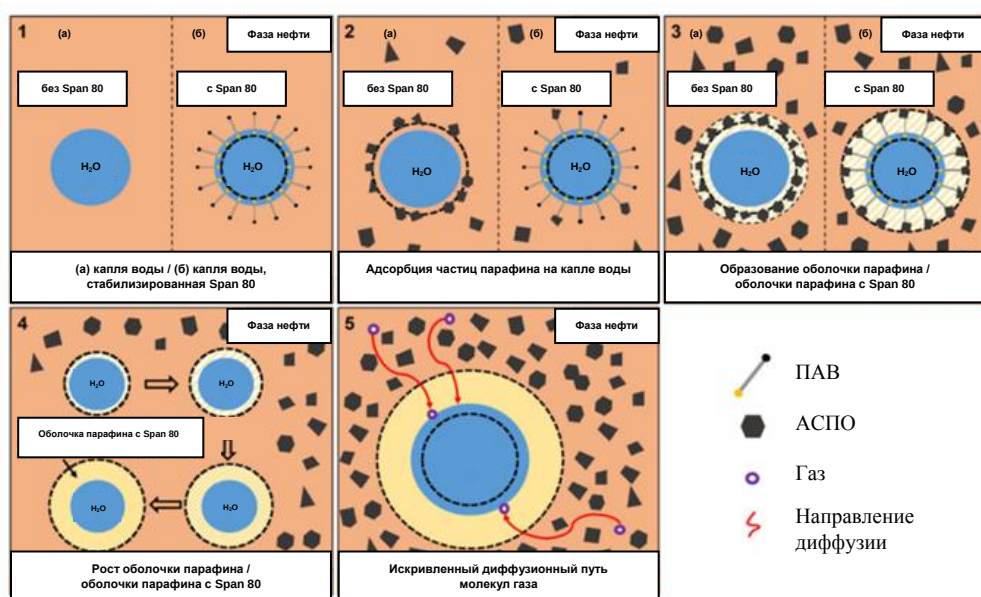


Рис. 3. Схема образования молекул гидрата в присутствии ПАВ и парафина [4]

Fig. 3. Scheme of hydrate molecules formation in the presence of surfactant and paraffin [4]

Условия образования АСПО

Образование АСПО в нефтепромысловом оборудовании встречается намного чаще, чем газогидратные отложения. Разработка многих месторождений Волго-Уральской и Западно-Сибирской нефтегазоносной провинций осложняется образованием АСПО. Соответственно, большое количество методов и технологий по борьбе с данными отложениями было изучено и испытано на добывающих скважинах, расположенных в этих провинциях. Однако современные разработки позволяют увеличить эффективность эксплуатации добывающих скважин, осложненных выпадением АСПО в добывающих скважинах, снижая затраты средств и времени на проведение мероприятий по удалению АСПО [44].

Первоначально необходим анализ химической составляющей образования АСПО при добыче углеводородов. В работе [45] представлена базовая информация о механизме образования молекул асфальтеновых и парафиновых углеводородов. Молекулы парафиновых углеводородов аполярны, что сводит их взаимодействие к Ван-дер-Ваальсовым или Лондонским дисперсионным силам. Молекулы асфальтенов, наоборот, полярные, в них преобладают взаимодействия водородного или ассоциативного типа. В статьях [46, 47] подробно представлены стадии образования АСПО:

- гелеобразование парафинообразного масла на холодной поверхности трубы;
- молекулярная диффузия частиц парафина к слою геля из объема нефти;
- внутренняя диффузия молекул парафина через захваченную нефть;
- осаждение этих молекул парафина в осадок;
- обратная диффузия депарафинированного масла из слоя геля в поток.

Статья [48] представляет критический обзор основных механизмов осаждения парафиновых отложений. В работе [49] представлено дополнение исходной прогнозной модели Won, представленной в исследовании [48], способной рассчитывать температуру выпадения АСПО уже с учетом компонентного состава нефти. Представленная в работе модель достаточно проста для оценки условий выпадения АСПО, так как в качестве исходных данных нужны только молярная доля и молекулярная масса каждого компонента. Точность модели была подтверждена экспериментами для 18 образцов нефти. Абсолютное отклонение в данных экспериментах составило 3 %. Основной целью исследований [11, 13] является подбор оптимальных условий эксплуатации скважины и параметров ввода ингибитора для снижения выпадения парафинов в промысловом оборудовании. В ходе исследований было выяснено, что увеличение частоты, производительности насоса, количества ступеней установки, а также уменьшение внутреннего диаметра НКТ приводит к изменению расхода и напорно-расходной характеристики насоса, а также снижению глубины образования АСПО в НКТ. Решению проблемы добычи высоковязкой нефти из многопласто-

вых залежей с помощью установки ЭЦН посвящено исследование [7]. Для обеспечения добычи нефти из таких залежей предлагается специальная компоновка внутрискважинного оборудования для одновременно-раздельной эксплуатации скважины. Данное решение позволяет разбавлять вязкую нефть одного пласта более легкими фракциями из вышележащего пласта, что снижает общую вязкость поднимаемого флюида.

В обзоре [50] приводятся основные технологии и методы, применяемые для предотвращения или устранения отложений АСПО, образующихся в скважинах. В обзоре раскрывается проблематика борьбы с АСПО в скважинном пространстве по сравнению с трубопроводом. В работе представлена сводная таблица с преимуществами и недостатками различных методов борьбы с органическими отложениями. Самым технологичным методом борьбы с АСПО является применение химических ингибиторов, препятствующих их образованию в скважинном пространстве. Основным требованием к таким химическим реагентам, кроме самого эффекта ингибирования, является минимизация потерь ингибитора в призабойной зоне скважины из-за адсорбции реагента в горных породах [51]. В работе [52] представлен комплексный анализ эффективности применения ингибиторов образования АСПО при добыче и транспортировке углеводородов. В работах [53, 54] представлен новый ингибитор образования АСПО комбинированного действия. Основным требованием к таким химическим реагентам, кроме самого эффекта ингибирования, является минимизация адсорбции ингибитора в призабойной зоне скважины [51]. Авторами исследования [55] представлена комплексная технология по борьбе с образованием АСПО в призабойной зоне скважин. Технология включает в себя применение промывки скважины специальным растворителем для удаления уже образовавшихся отложений. Также применяются и другие способы борьбы с образованием АСПО в добывающих скважинах. В работах [56–58] изучается влияние материала эксплуатационных труб на условия отложения АСПО. В исследовании [59] представлена схема нагревательного кабеля в качестве метода борьбы с выпадением парафинов в скважине. В статье [60] представлена технология магнито-реагентной обработки нефтепромыслового оборудования. В исследовании был оценен синергетический эффект магнитного поля и ингибиторов для борьбы с АСПО. В результате было получено, что применение магнитного поля позволит сократить расход химических реагентов при сохранении качества обработки.

Таким образом, многообразие различных технологий по борьбе с образованием АСПО в скважинном оборудовании позволяет выбрать оптимальную технологию для рассматриваемого месторождения. Однако многие технологии на сегодняшний день еще не прошли достаточного количества промысловых испытаний для полноценной оценки их эффективности. Соответственно, требуются дальнейшие лабораторные и полевые исследования ингибиторов АСПО, различных материалов НКТ, синергетического эффекта от применения сразу нескольких технологий.

Работа установки электроцентробежного насоса в осложненных условиях

Также необходимо изучить работу скважинного оборудования, а именно УЭЦН в осложненных условиях. К данным условиям относятся: свободный газ, высокая вязкость поднимаемого флюида. Из-за данных факторов происходят сильные скачки давления, что негативно сказывается на межремонтном периоде работы погружного насоса. В дополнение к этому необходимо оценить влияние работы УЭЦН на факторы образования органических отложений в скважине. Как было установлено в работе [8], УЭЦН оказывает влияние на условия отложения газовых гидратов и АСПО. Происходит это из-за того, что изменение определенных параметров работы УЭЦН приводит к дополнительному подогреву потока, а также меняет режим его течения, снижая начальную глубину образования газовых гидратов и АСПО. Полученные закономерности начальных глубин образования газовых гидратов и АСПО от параметров скважинного оборудования: глубина спуска погружного насоса, диаметр проходного сечения штуцера, частота работы УЭЦН, требуют дальнейших исследований. Далее будут представлены исследования, направленные на изучение работы УЭЦН в осложненных условиях.

Глубоким изучением параметров работы УЭЦН в различных осложняющих условиях занимался Zhu Jianjun. В работе [61] представлен всесторонний обзор основных внешних факторов, влияющих на работу УЭЦН в условиях повышенного содержания свободного газа в потоке. Также были представлены эмпирическая и механистическая модели изменения давления нагнетания при большом количестве свободного газа на приеме насоса. В работе [62] Zhu Jianjun представил модернизацию данной механистической модели, которая смогла бы также учитывать изменение вязкости флюида внутри и снаружи установки.

В исследованиях [63, 64] представлен анализ теплообмена работающей УЭЦН с окружающей средой. Представленная модель способна оценивать изменение температуры как установки, так и проходящего внутри и снаружи установки флюида. Результаты данных работ помогут лучше понять теорию теплообмена между работающей УЭЦН и добываемым флюидом.

Следовательно, работа УЭЦН оказывает значительное влияние на термобарические условия добычи нефти, что позволяет с помощью изменения параметров работающей установки либо создать условия неустойчивости отложений, либо снизить начальную глубину образования газовых гидратов и АСПО.

Заключение

Анализ представленных выше факторов образования газовых гидратов и АСПО позволит уменьшить количество пробелов в теории образования органических отложений в скважинном пространстве. Также это позволит выделить основные факторы, влияющие на образование отложений в скважине, которые можно изменять и регулировать с помощью параметров работы скважинного оборудования. Однако остаются другие составляющие общей теории образования органи-

ческих отложений в добывающих скважинах, открытие которых научным сообществом еще только предстоит.

Так, например, авторами литературного обзора [9] отмечается, что поведение газовых гидратов при высоких давлениях и смешении гидратов с тяжелыми фракциями нефти не поддается адекватному моделированию. Полностью не изучена кинетическая составляющая образования кристаллогидратов. Сложность заключается в том, что гидраты представляют собой твердую кристаллическую структуру, которая описывается медленной кинетической моделью твердого вещества [65]. А образуется это твердая фаза на границе жидкости и газа из аморфного состояния, что вносит дополнительные сложности в модель образования газовых гидратов. Сложная геометрия клапанов, искривлений, других узлов труб на промышленном оборудовании также затрудняет моделирование условий образования кристаллогидратов и требует дополнительных исследований для решения поставленной задачи [39].

Авторы работ [12, 66, 67] указывают на недостаточную изученность влияния сдвиговых сил и вязкости образованного из нефти парафино-геля на процесс образования АСПО. В работах [68, 69] было отмечено, что осаждение АСПО не может быть полностью описано молекулярной диффузией частиц между фазами. Осаждение АСПО предлагается описывать, сравнивая местный предел текучести и местное напряжение сдвига агломератов АСПО. Молекулярная диффузия в этой теории является основополагающим фактором изменения предела текучести, а не необходимым условием осаждения. Авторами статьи [70] представлен анализ точности лабораторных методов, применяемых для оценки эффективности ингибиторов парафиноотложения. В работе рассматривается три метода: циркуляционная установка, метод холодного стержня, система Тайлера-Куэрта. Недостаток данных методов, как отмечают авторы, заключается в их не самой высокой точности. Авторами работы [71] отмечается важность и надежность проведения лабораторных исследований эффективности ингибиторов АСПО и условий их отложения перед полевыми испытаниями на месторождениях. Необходимо повышать точность лабораторного оборудования.

Дополнительно приводятся исследования по модернизации существующих тепловых моделей добывающих скважин. Новые модели способны учитывать тепловой эффект от явлений, происходящих в многолетнемерзлых породах. В работе [64] также большое внимание уделяется изучению влияния многофазного потока на теплообмен с установкой ЭЦН. В ходе глушения скважины и закачки специализированной жидкости возможно охлаждение призабойной зоны и ствола скважины. Данный фактор способствует дальнейшему образованию АСПО в скважинном пространстве, осложняя будущий пуск в работу скважины и ее эксплуатацию [72–74].

Новые разработки в технологиях применения ингибиторов гидратообразования также позволят снизить затраты при подготовке химических ингибиторов и их внедрении в производственный процесс нефтегазового промысла. Как отмечалось ранее, ки-

нетические ингибиторы гидратообразования являются наиболее перспективными химическими реагентами для борьбы с кристаллогидратами. В исследовании [75] представлены основные проблемы для нефтегазовой промышленности по применению ингибиторов гидратообразования:

- большой расход термодинамических ингибиторов, необходимый для достижения требуемого результата;
- трудность биологического разложения термодинамических ингибиторов и их восстановления на промысле;
- усложнение расчета эффективных концентраций химических ингибиторов из-за стохастического характера зародышеобразования;
- усложнение определения пределов применимости ингибиторов из-за низкой активности химических реагентов при экстремальных низких температурах и высоких давлениях.

В ходе литературного обзора по анализу влияния газогидратных отложений и АСПО на условия работы добывающих скважин были сделаны следующие выводы:

- Теория образования органических отложений нуждается в дальнейших доработках. Для дополнения этой теории требуется ликвидировать пробелы в процессе агломерации и образования газовых гидратов и АСПО с точки зрения молекулярной и кинетической составляющей.
- Химические ингибиторы являются самым эффективным методом борьбы как с газогидратами, так и с АСПО. Среди ингибиторов гидратообразова-

ния самой перспективной технологией являются кинетический ингибитор и антиагломератор, а среди ингибиторов АСПО – ингибиторы комплексного действия и депрессаторы.

- Необходимо дальше изучать термобарические условия потока внутри скважины. Давление и температура остаются самыми важными параметрами в условиях образования органических отложений. Реологические параметры и состав добываемой нефти, газосодержание и характер распределения свободного газа внутри потока, работа скважинного оборудования также оказывают влияние на глубины образования кристаллогидратов и АСПО.

- Остается неизученным влияние на органические отложения в скважинном оборудовании таких параметров потока, как взаимодействие пузырьков газа, наличие в нефти естественных депрессаторов, молекулярные явления на границе раздела фаз, влияющие на агломерацию органических веществ в скважине. Всё это нуждается в дополнительных лабораторных исследованиях с применением современного оборудования.

Также в ходе работы были подготовлены две таблицы. В табл. 2 представлены основные параметры, оказывающие влияние на образование газогидратных отложений при механизированной добыче нефти. В табл. 3 представлены основные параметры, оказывающие влияние на образование АСПО при механизированной добыче нефти.

Таблица 2. Параметры, влияющие на образование гидратных отложений при механизированной добыче углеводородов (материал автора)

Table 2. Parameters affecting the formation of hydrate deposits in mechanized hydrocarbon production (author's material)

Параметры, влияющие на образование газовых гидратов Parameters affecting the formation of gas hydrates	Температура потока Flow temperature	Распределение давления Pressure distribution	Газосодержание потока Flow gas content	Наличие центров кристаллизации (механические примеси, кристаллы парафина) Presence of crystallization centers (mechanical impurities, paraffin crystals)	Дросселирование Throttling	Структура потока (взаимодействие пузырьков газа, дисперсность потока) Flow structure (interaction of gas bubbles, flow dispersion)	Молекулярные явления на границе фаз Molecular phenomena at the phase boundary	Обводненность Watercut
Влияние работы УЭЦН на выбранные параметры Effect of electric submersible pump operation on selected parameters	Влияет Affects			Не влияет No effect		Влияет значительно Affects significantly	Не влияет No effect	

Таблица 3. Параметры, влияющие на образование АСПО при механизированной добыче углеводородов (материал автора)

Table 3. Parameters affecting the formation of asphaltene-resin-paraffin deposits in mechanized hydrocarbon production (author's material)

Параметры, влияющие на образование АСПО Parameters affecting ARPD formation	Температура потока Flow temperature	Распределение давления Pressure distribution	Газосодержание потока Flow gas content	Содержание смол и асфальтенов Resin and asphaltene content	Кинетика процесса (сдвиговые силы) Process kinetics (shear forces)	Структура потока Flow structure	Молекулярные явления на границе фаз (молекулярная диффузия) Molecular phenomena at the phase boundary (molecular diffusion)	Обводненность Watercut
Влияние работы УЭЦН на выбранные параметры Effect of electric submersible pump operation on selected parameters	Влияет Affects			Не влияет No effect	Влияет незначительно Little effect	Влияет Affects	Не влияет No effect	

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Multi-criteria decision making approaches to select appropriate enhanced oil recovery techniques in petroleum industries / Zhenzhen Wei, Shanyu Zhu, Xiaodong Dai, Xuewu Wang, L.M. Yarpanto, I.R. Raupov // *Energy Reports*. – 2021. – V. 7. – P. 2751–2758.
2. Podoprigora D., Byazrov R., Sytnik J. The comprehensive overview of large-volume surfactant slugs injection for enhancing oil recovery: status and the outlook // *Energies*. – 2022. – V. 15. – № 21. – P. 8300–8321.
3. Raupov I., Rogachev M., Sytnik J. Design of a polymer composition for the conformance control in heterogeneous reservoirs // *Energies*. – 2023. – V. 16. – № 1. – P. 515–533.
4. Effect of wax on hydrate formation in water-in-oil emulsions / Wei Wang, Qiyu Huang, Haimin Zheng, Qiuchen Wang, Dongxu Zhang, Xianwen Cheng, Rongbin Li // *Journal of Dispersion Science and Technology*. Taylor & Francis. – 2020. – V. 41. – № 12. – P. 1821–1830.
5. Wavelet analysis for evaluating the length of precast spliced piles using low strain integrity testing / E. Loseva, I. Lozovsky, R. Zhostkov, V. Syasko // *Applied Sciences*. – 2022. – V. 12. – № 21. – P. 10901–10912.
6. Study of the effect of cutting frozen soils on the supports of above-ground trunk pipelines / I.A. Shammazov, A.M. Batyrov, D.I. Sidorin, T. van Nguyen // *Applied Sciences*. – 2023. – V. 13. – № 5. – P. 3139–3157.
7. Рогачев М.К., Александров А.Н. Обоснование комплексной технологии предупреждения образования асфальтосмолопарафиновых отложений при добыче высокопарафинистой нефти погружными электроцентробежными насосами из многопластовых залежей // *Записки Горного института*. – 2021. – Т. 250. – № 4. – С. 596–605.
8. Воронцов А.А., Коробов Г.Ю. Повышение эффективности эксплуатации установки электроцентробежного насоса в условиях образования газогидратов // *Проблемы разработки месторождений углеводородных и рудных полезных ископаемых: Материалы XIII Всероссийской научно-технической конференции*. – Пермь, 2020. – Т. II. – С. 87–94.
9. Sloan E.D. Fundamental principles and applications of natural gas hydrates // *Nature*. – 2003. – V. 426. – № 6964. – P. 353–359.
10. Drilling in gas hydrates: managing gas appearance risks / R. Gizatullin, M. Dvoynikov, N. Romanova, V. Nikitin // *Energies*. – 2023. – V. 16. – № 5. – P. 1–13.
11. Struchkov I.A., Rogachev M.K. The challenges of waxy oil production in a Russian oil field and laboratory investigations // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2018. – V. 163. – P. 91–99.
12. Sandyga M.S., Struchkov I.A., Rogachev M.K. Formation damage induced by wax deposition: laboratory investigations and modeling // *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*. – 2020. – V. 10. – № 6. – P. 2541–2558.
13. Aleksandrov A.N., Kishchenko M.A., Nguyen Van T. Simulating the formation of wax deposits in wells using electric submersible pumps // *Advances in Raw Material Industries for Sustainable Development Goals*. – 2021. – № 1. – P. 283–295.
14. Gas hydrates in sustainable chemistry / A. Hassanpouryouzband, E. Joonaki, M. Vasheghani Farahani, S. Takeya, C. Ruppel, J. Yang, N.J. English, J.M. Schicks, K. Edlmann, H. Mehrabian, Z.M. Aman, B. Tohidi // *Chemical Society Reviews*. Royal Society of Chemistry. – 2020. – V. 49. – № 15. – P. 5225–5309.
15. Antiagglomerants affect gas hydrate growth / T. Bui, F. Sicard, D. Monteiro, Q. Lan, M. Ceglie, Ch. Burrell, A. Striolo // *Journal of Physical Chemistry Letters*. – 2018. – V. 9. – № 12. – P. 3491–3496.
16. Коробов Г.Ю., Рогачев М.К. Исследование влияния асфальтосмолистых компонентов в нефти на процесс образования асфальтосмолопарафиновых отложений // *Электронный Научный Журнал «Нефтегазовое Дело»*. – 2015. – № 3. – С. 162–173. URL: http://ogbus.ru/files/ogbus/issues/3_2015/ogbus_3_2015_p162-173_KorobovGYu_ru.pdf (30.03.2023).
17. Multiple controlling factors for methane hydrate formation in water-continuous system / Weiqi Fu, Zhiyuan Wang, Baojiang Sun, Chuanxin Ji, Jianbo Zhang // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2019. – V. 131. – P. 757–771.
18. Prediction of equilibrium conditions for gas hydrates in the organic inhibitor aqueous solutions using a thermodynamic consistency-based model / Siguang Li, Yanjun Li, Longbin Yang, Yang Han, Zhibin Jiang // *Fluid Phase Equilibria*. – 2021. – V. 544. – P. 113–118.
19. Aman Z.M., Koh C.A. Interfacial phenomena in gas hydrate systems // *Chemical Society Reviews*. Royal Society of Chemistry. – 2016. – V. 45. – № 6. – P. 1678–1690.
20. Korobov G., Podoprigora D. Depth computation for the onset of organic sedimentation formation in the oil producing well as exemplified by the Sibirskeye oil field // *Acta Technica CSAV (Ceskoslovensk Akademie Ved)*. – 2018. – V. 63. – № 3. – P. 481–492.
21. A mechanistic heat transfer model for horizontal two-phase flow / R. Manabe, Q. Wang, H.-Q. Zhang, C. Sarica, J.P. Brill // *4th North American Conference on Multiphase Technology*. – Denver, 2004. – P. 45–63.
22. Two phase flow heat transfer analysis at different flow patterns in the wellbore / Yonghai Gao, Yanchun Cui, Boyue Xu, Baojiang Sun, Xinxin Zhao, Hao Li, Litao Chen // *Applied Thermal Engineering*. – 2017. – V. 117. – P. 544–552.
23. Coupled thermal model of wellbore and permafrost in Arctic regions / Xuerui Wang, Zhiyuan Wang, Xuejing Deng, Baojiang Sun, Yang Zhao, Weiqi Fu // *Applied Thermal Engineering*. – 2017. – V. 123. – P. 1291–1299.
24. Череповицын А.Е., Липина С.А., Евсеева О.О. Инновационный подход к освоению минерально-сырьевого потенциала Арктической зоны РФ // *Записки Горного института*. – 2018. – Т. 232. – С. 438–444.
25. Череповицын А.Е., Цветков П.С., Евсеева О.О. Критический анализ методических подходов к оценке устойчивости арктических нефтегазовых проектов // *Записки Горного института*. – 2021. – Т. 249. – № 5. – С. 463–478.
26. Барьеры реализации водородных инициатив в контексте устойчивого развития глобальной энергетики / В.С. Литвиненко, П.С. Цветков, М.В. Двойников, Г.В. Буслаев // *Записки Горного института*. – 2020. – Т. 244. – № 4. – С. 428–438.
27. Hydrate formation and deposition in a gas-dominant flowloop: Initial studies of the effect of velocity and subcooling / Z.M. Aman, M. di Lorenzo, K. Kozielski, C.A. Koh, P. Warrier, M.L. Johns, E.F. May // *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. – 2016. – V. 35. – P. 1490–1498.
28. The study of gas hydrate formation and particle transportability using a high pressure flowloop / A. AA-Majid, W. Lee, V. Srivastava, L. Chen, G. Grasso, P. Vijayamohan, P. Chaudhari, E.D. Sloan, C.A. Koh // *Proceedings of the Annual Offshore Technology Conference*. – Houston, 2016. – V. 5. – P. 4447–4460.
29. Mechanisms of gas hydrate formation and inhibition / C.A. Koh, R.E. Westcott, W. Zhang, K. Hirachand, J.L. Creek, A.K. Soper // *Fluid Phase Equilibria*. – 2002. – V. 194. – P. 143–151.
30. Schicks J.M., Luzzi-Helbing M. Kinetic and thermodynamic aspects of clathrate hydrate nucleation and growth // *Journal of Chemical and Engineering Data*. – 2015. – V. 60. – № 2. – P. 269–277.
31. Fandiño O., Ruffine L. Methane hydrate nucleation and growth from the bulk phase: Further insights into their mechanisms // *Fuel*. – 2014. – V. 117. – P. 442–449.
32. Experimental study on hydrate formation and flow characteristics with high water cuts / Shidong Zhou, Xiaokang Chen, Chengyuan He, Shuli Wang, Shuhua Zhao, Xiaofang Lv // *Energies*. – 2018. – V. 11. – № 10. – P. 1–14.
33. Guimin Y., Hao J., Qingwen K. Study on hydrate risk in the water drainage pipeline for offshore natural gas hydrate pilot production // *Frontiers in Earth Science*. – 2022. – V. 9. – P. 1–9.
34. Modelling the hydrate formation condition in consideration of hydrates structure transformation / Jingbo Gao, Qiang Sun, Zhen Xu, Yu Zhang, Yiwei Wang, Xuqiang Guo, Lanying Yang // *Chemical Engineering Science*. – 2022. – V. 251. – P. 117–129.
35. Hydrate bedding modeling in oil-dominated systems / Y. Wang, B.C. Hutchinson, M.A. Pickarts, D.C. Salmin, V. Srivastava, C.A. Koh, L.E. Zepa // *Fuel*. – 2021. – V. 289. – P. 119–132.
36. A new hydrate deposition prediction model for gas-dominated systems with free water / Zhiyuan Wang, Jianbo Zhang, Baojiang Sun, Litao Chen, Yang Zhao, Weiqi Fu // *Chemical Engineering Science*. – 2017. – V. 163. – P. 145–154.

37. Improved thermal model considering hydrate formation and deposition in gas-dominated systems with free water / Zhiyuan Wang, Jing Yu, Jianbo Zhang, Shun Liu, Yonghai Gao, Hua Xiang, Baojiang Sun // *Fuel*. – 2019. – V. 236. – P. 870–879.
38. Modeling of Hydrate Blockage in Gas-Dominated Systems / Zhiyuan Wang, Yang Zhao, Baojiang Sun, Litao Chen, Jianbo Zhang, Xuerui Wang // *Energy and Fuels*. – 2016. – V. 30. – № 6. – P. 4653–4666.
39. Flow assurance during deepwater gas well testing: Hydrate blockage prediction and prevention / Zhiyuan Wang, Yang Zhao, Jianbo Zhang, Shaowei Pan, Jing Yu, Baojiang Sun // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2018. – V. 163. – P. 211–216.
40. Khamehchi E., Shamohammadi E., Yousefi S.H. Predicting the hydrate formation temperature by a new correlation and neural network // *Gas Processing Journal*. – 2013. – V. 1. – № 1. – P. 41–50.
41. Prediction of methane hydrate formation conditions in salt water using machine learning algorithms / Hongfei Xu, Zeren Jiao, Zhuran Zhang, Mitchell Huffman, Qingsheng Wang // *Computers and Chemical Engineering*. – 2021. – V. 151. – P. 107358–107366.
42. Decomposition kinetics and self-preservation of methane hydrate particles in crude oil dispersions: experiments and theory / A.A. Sizikov, V.A. Vlasov, A.S. Stoporev, A.Y. Manakov // *Energy & Fuels*. – 2019. – V. 33. – № 12. – P. 12353–12365.
43. Unusual self-preservation of methane hydrate in oil suspensions / A.S. Stoporev, A.Yu. Manakov., L.K. Altunina, F.V. Bogoslovsky, L.A. Strelets, E.Ya. Aladko // *Energy & Fuels*. – 2014. – V. 28. – № 2. – P. 794–802.
44. Investigation of the influences of asphaltene deposition on oilfield development using reservoir simulation / D.S. Tananykhin, I.A. Struchkov, A. Khormali, P.V. Roschin // *Petroleum Exploration and Development*. PetroChina. – 2022. – V. 49. – № 5. – P. 1138–1149.
45. Leontaritis K.J. Wax deposition envelope of gas condensates // *Proceedings of the Annual Offshore Technology Conference*. – Houston, 1997. – V. 3. – P. 341–348.
46. Ragunathan T., Husin H., Wood C.D. Wax formation mechanisms, wax chemical inhibitors and factors affecting chemical inhibition // *Applied Sciences (Switzerland)*. – 2020. – V. 10. – № 2. – P. 1–18.
47. Adeyanju O.A., Oyekunle L.O. Experimental study of wax deposition in a single phase sub-cooled oil pipelines // *Nigeria Annual International Conference and Exhibition. SPE*. – Lagos, 2013. – P. 1–18.
48. Sousa A.M., Matos H.A., Guerreiro L. Wax deposition mechanisms and the effect of emulsions and carbon dioxide injection on wax deposition: Critical review // *Petroleum*. – 2020. – V. 6. – № 3. – P. 215–225.
49. Rocha T.S., Costa G.M., Embiruçu M. Modeling wax appearance temperature // *SPE Latin American and Caribbean Petroleum Engineering Conference*. – Quito, 2015. – P. 18–20.
50. Sousa A.L., Matos H.A., Guerreiro L.P. Preventing and removing wax deposition inside vertical wells: a review // *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*. – 2019. – V. 9. – № 3. – P. 2091–2107.
51. Study on waxy crudes characterisation and chemical inhibitor assessment / Nura Makwashi, Donglin Zhao, Mukhtar Abdulkadir, Tariq Ahmed, Ishaka Muhammad // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2021. – V. 204. – P. 108734–108750.
52. Khaibullina K.S., Korobov G.Y., Lekomtsev A.V. Development of an asphalt-resin-paraffin deposits inhibitor and substantiation of the technological parameters of its injection into the bottom-hole formation zone // *Periodico Tche Quimica*. – 2020. – V. 17. – № 34. – P. 769–781.
53. Khaibullina K.S., Sagirova L.R., Sandyga M.S. Substantiation and selection of an inhibitor for preventing the formation of asphalt-resin-paraffin deposits // *Periodico Tche Quimica*. – 2020. – V. 17. – № 34. – P. 541–551.
54. Korobov G., Raupov I. Study of adsorption and desorption of asphaltene sediments inhibitor in the bottomhole formation zone // *International Journal of Applied Engineering Research*. – 2017. – V. 12. – № 2. – P. 267–272.
55. Nurgalieva K.S., Saychenko L.A., Riazi M. Improving the efficiency of oil and gas wells complicated by the formation of asphalt-resin-paraffin deposits // *Energies*. – 2021. – V. 14. – № 20. – P. 6673–6689.
56. Investigation of delayed formation of wax deposits in polyethylene pipe using a flow-loop / Rongbin Li, Qiyu Huang, Xiangrui Zhu, Dongxu Zhang, Yang Lv, R.G. Larson // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2021. – V. 196. – P. 108104–108115.
57. Юдин П.Е., Богатов М.В. Моделирование процесса выпадения асфальтосмолопарафиновых веществ на внутренней поверхности насосно-компрессорных труб с покрытием и без на лабораторном циркуляционном стенде // *Нефтегазовое дело*. – 2021. – Т. 19. – № 2. – С. 97–104.
58. Bai J., Jin X., Wu J.T. Multifunctional anti-wax coatings for paraffin control in oil pipelines // *Petroleum Science*. – 2019. – V. 16. – № 3. – P. 619–631.
59. Kovrigin L., Kukharchuk I. Automatic control system for removal of paraffin deposits in oil well in permafrost region by thermal method // *Chemical Engineering Research and Design*. – 2016. – V. 115. – P. 116–121.
60. Голубев И.А., Голубев А.В., Лаптев А.Б. Практика применения аппаратов магнитной обработки для интенсификации процессов первичной подготовки нефти // *Записки Горного института*. – 2020. – Т. 245. – № 1. – С. 554–560.
61. Zhu J., Zhang H.Q. A review of experiments and modeling of gas-liquid flow in electrical submersible pumps // *Energies*. – 2018. – V. 11. – № 1. – P. 180–221.
62. Modeling flow pattern transitions in electrical submersible pump under gassy flow conditions / Jianjun Zhu, Jiecheng Zhang, Guangqiang Cao, Qingqi Zhao, Jianlin Peng, Haiwen Zhu, Hong-Quan Zhang // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2019. – V. 180. – P. 471–484.
63. Merys S., Aydin H., Eren T. Design of electrical submersible pumps in methane hydrate production wells: A case study in Nankai trough methane hydrates // *Upstream Oil and Gas Technology*. – 2020. – V. 5. – P. 100023–100037.
64. Heat dissipation of the Electrical Submersible Pump (ESP) installed in a subsea skid / J.R. Martins, D. da Cunha Ribeiro, F. de Assis Ressel Pereira, M.P. Ribeiro, O.J. Romero // *Oil and Gas Science and Technology*. – 2020. – V. 75. – P. 1–13.
65. Lin J. Research on formation prediction model of gas hydrate // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2021. – V. 651. – № 3. – P. 32–41.
66. Rogachev M.K., Nguyen Van T., Aleksandrov A.N. Technology for preventing the wax deposit formation in gas-lift wells at offshore oil and gas fields in Vietnam // *Energies*. – 2021. – V. 14. – № 16. – P. 5016–5035.
67. A comprehensive method for determining the dewaxing interval period in gas lift wells / N. Van Thang, Ph. Thanh Vinh, M.K. Rogachev, G.Yu. Korobov, D.V. Parfenov, A.O. Zhurkevich, Sh.R. Islamov // *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*. – 2023. – V. 13. – № 4. – P. 1163–1179.
68. Investigation into optimization condition of thermal stimulation for hydrate dissociation in the sandy reservoir / Jing-Chun Feng, Yi Wang, Xiao-Sen Li, Zhao-Yang Chen, Gang Li, Yu Zhang // *Applied Energy*. – 2015. – V. 154. – P. 995–1003.
69. Van T.N., Aleksandrov A.N., Rogachev M.K. An extensive solution to prevent wax deposition formation in gas-lift wells // *Journal of Applied Engineering Science*. – 2022. – V. 20. – № 1. – P. 264–275.
70. Narrowing the gap between laboratory and oilfield using real-time paraffin fouling measurement / Ch. Russell, L. Padula, S. Gon, E. Pohl, A. Neilson, R. Sharpe // *Energy and Fuels*. – 2019. – V. 33. – № 6. – P. 5216–5229.
71. Re-evaluating the wax flow assurance chemical mitigation strategy for a major deepwater oil pipeline in Malaysia yields significant benefits / Marsidi Nurul Ashikin, Bak Amir Sani Abdul, M.M. Nawi Shakir, Lajawai Maxwell Tommie, Istiyarso Istiyarso, Norhamidi Muhamad Kelly Craig, Gusting Karlos // *Society of Petroleum Engineers – SPE/IATMI Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition*. – Bali, 2019. – P. 1–26.
72. Well killing technology before workover operation in complicated conditions / D.V. Mardashov, M.K. Rogachev, Yu.V. Zeigman, V.V. Mukhametshin // *Energies*. – 2021. – V. 14. – № 3. – P. 654–669.
73. Mardashov D.V. Development of blocking compositions with a bridging agent for oil well killing in conditions of abnormally low formation pressure and carbonate reservoir rocks // *Journal of Mining Institute*. – 2021. – V. 251. – № 3. – P. 667–677.

74. Mardashov D., Bondarenko A., Raupov I. Technique for calculating technological parameters of non-Newtonian liquids injection into oil well during workover // Journal of Mining Institute. – 2022. – V. 258. – P. 881–894.
75. Nasir Q., Suleman H., Elsheikh Y.A. A review on the role and impact of various additives as promoters/ inhibitors for gas hydrate formation // Journal of Natural Gas Science and Engineering. – 2020. – V. 76. – P. 103211–103235.
- Поступила: 14.04.2023 г.*
Прошла рецензирование: 22.05.2023 г.

Информация об авторах

Коробов Г.Ю., кандидат технических наук, доцент кафедры разработки и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений Санкт-Петербургского горного университета.

Воронцов А.А., аспирант кафедры разработки и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений Санкт-Петербургского горного университета.

UDC 622.276

STUDY OF CONDITIONS FOR GAS HYDRATE AND ASPHALTENE-RESIN-PARAFFIN DEPOSITS FORMATION IN MECHANIZED OIL PRODUCTION

Grigory Y. Korobov¹,
korobovgrigory@yandex.ru

Andrey A. Vorontsov¹,
andrey-vorontsov98@yandex.ru

¹ Saint Petersburg Mining University,
2, 21st line of Vasilievsky Island, Saint Petersburg, 199106, Russia.

The relevance of the research is caused by the lack of study of gas hydrates and asphaltene-resin-paraffin deposits formation in the borehole space. The properties of the organic deposits formed significantly depend on conditions of their formation. Accordingly, more accurate understanding of principle of deposits formation allows predicting their agglomeration and selecting effective ways to combat the deposition of gas hydrates and asphaltene-resin-paraffin deposits. In addition, information presented in the article makes it possible to evaluate the effect of the main factors influencing the conditions of gas hydrates and asphaltene-resin-paraffin deposits formation. There is an opportunity to point out the most important factors, which can be controlled by changing the parameters of the downhole equipment. These studies can help to optimize selection of downhole equipment parameters in the conditions of organic deposits formation.

The main aim of the research is to analyze the conditions of gas hydrate and asphaltene-resin-paraffin deposits formation in production well; to analyze the results of previous studies on the factors affecting the formation of gas hydrates and asphaltene-resin-paraffin deposits in the borehole space.

Objects: factors affecting formation of gas hydrates and asphaltene-resin-paraffin deposits on inner surface of the oilfield equipment.

Methods: literature review of publications in peer-reviewed journals; analysis of the results of previous studies, formulation of main ideas and trends, identifying gaps and shortcomings of existing researches.

Results. The paper describes the main mechanisms of gas hydrates and asphaltene-resin-paraffin deposits formation on inner surface of the oilfield equipment and introduces a review of previous studies devoted to the analysis of formation mechanisms of asphaltene-resin-paraffin deposits and gas hydrates. The analysis revealed gaps and assumptions in the theory of formation of gas hydrates and asphaltene-resin-paraffin deposits, which require further study of their formation principles. The main factors that depend on the operation of downhole equipment, as well as affecting the formation of organic deposition are analyzed: thermal baric conditions, gas content, throttling, watering, molecular phenomena. These factors are summarized in separate tables.

Key words:

Gas hydrates, asphaltene-resin-paraffin deposits, electric centrifugal pump unit, well thermobaric conditions, asphaltene-resin-paraffin deposits and gas hydrate formation factors.

REFERENCES

1. Zhenzhen Wei, Shanyu Zhu, Xiaodong Dai, Xuewu Wang, Lis M. Yapanto, Inzir Ramilevich Raupov. Multi-criteria decision making approaches to select appropriate enhanced oil recovery techniques in petroleum industries. *Energy Reports*, 2021, vol. 7, pp. 2751–2758.
2. Podoprigora D., Byazrov R., Sytnik J. The comprehensive overview of large-volume surfactant slugs injection for enhancing oil recovery: status and the outlook. *Energies*, 2022, vol. 15, no. 21, pp. 8300–8321.
3. Raupov I., Rogachev M., Sytnik J. Design of a polymer composition for the conformance control in heterogeneous reservoirs. *Energies*, 2023, vol. 16, no. 1, pp. 515–533.
4. Wei Wang, Qiyu Huang, Haimin Zheng, Qiuchen Wang, Dongxu Zhang, Xianwen Cheng, Rongbin Li. Effect of wax on hydrate formation in water-in-oil emulsions. *Journal of Dispersion Science and Technology*. Taylor & Francis, 2020, vol. 41, no. 12, pp. 1821–1830.
5. Loseva E., Lozovsky I., Zhostkov R., Syasko V. Wavelet analysis for evaluating the length of precast spliced piles using low strain integrity testing. *Applied Sciences*, 2022, vol. 12, no. 21, pp. 10901–10912.
6. Shammazov I.A., Batyrov A.M., Sidorkin D.I., Van Nguyen T. Study of the effect of cutting frozen soils on the supports of above-ground trunk pipelines. *Applied Sciences*, 2023, vol. 13, no. 5, pp. 3139–3157.
7. Rogachev M.K., Aleksandrov A.N. Justification of a comprehensive technology for preventing the formation of asphalt-resin-paraffin deposits during the production of highly paraffinic oil by electric submersible pumps from multifurcation deposits. *Journal of Mining Institute*, 2021. vol. 250, no. 4, pp. 596–605.
8. Vorontsov A.A., Korobov G.Yu. Povyshenie effektivnosti ekspluatatsii ustanovki elektrosentrobezhnogo nasosa v usloviyakh obrazovaniya gazogidratov [Increasing the efficiency of operation of the electrical submersible pump unit in conditions of gas hydrates formation]. *Problemy razrabotki mestorozhdeniy uglevodородnykh i rudnykh poleznykh iskopaemykh. Materialy XIII Vserossiyskoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii* [Problems of development of hydrocarbon and ore mineral resources. Materials of the XIII All-Russian scientific and technical conference]. Perm, 2020. Vol. 2, pp. 87–94.
9. Sloan E.D. Fundamental principles and applications of natural gas hydrates. *Nature*, 2003, vol. 426, no. 6964, pp. 353–359.
10. Gizatullin R., Dvoynikov M., Romanova N., Nikitin V. Drilling in gas hydrates: managing gas appearance risks. *Energies*, 2023, vol. 16, no. 5, pp. 1–13.
11. Struchkov I.A., Rogachev M.K. The challenges of waxy oil production in a Russian oil field and laboratory investigations. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2018, vol. 163, pp. 91–99.
12. Sandyga M.S., Struchkov I.A., Rogachev M.K. Formation damage induced by wax deposition: laboratory investigations and modeling. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 2020, vol. 10, no. 6, pp. 2541–2558.
13. Aleksandrov A.N., Kishchenko M.A., Nguyen Van T. Simulating the formation of wax deposits in wells using electric submersible pumps. *Advances in Raw Material Industries for Sustainable Development Goals*, 2021, no.1, pp. 283–295.
14. Hassanpouryouzband A., Joonaki E., Vasheghani Farahani M., Takeya S., Ruppel C., Yang J., English N.J., Schicks J.M., Edlmann K., Mehrabian H., Aman Z.M., Tohidi B. Gas hydrates in sustainable chemistry. *Chemical Society Reviews*. Royal Society of Chemistry, 2020, vol. 49, no. 15, pp. 5225–5309.

15. Bui T., Sicard F., Monteiro D., Lan Q., Ceglie M., Burrell Ch., Striolo A. Antiagglomerants affect gas hydrate growth. *Journal of Physical Chemistry Letters*, 2018, vol. 9, no. 12, pp. 3491–3496.
16. Korobov G.Yu., Rogachev M.K. Issledovanie vliyaniya asfaltosmolistyykh komponentov v nefti na protsess obrazovaniya asfaltosmoloparaffinovyykh otlozheniy [Research of influence of asphaltene-resin substances into oil on the formation of asphaltene-paraffin deposition]. *Setevoe izdanie «Neftegazovoe delo» Network Journal «Oil and Gas Business»*, 2015, vol. 3, pp. 162–173. Available at: http://ogbus.ru/files/ogbus/issues/3_2015/ogbus_3_2015_p162-173_KorobovGYu_ru.pdf (accessed 30 March 2023).
17. Weiqi Fu, Zhiyuan Wang, Baojiang Sun, Chuanxin Ji, Jianbo Zhang. Multiple controlling factors for methane hydrate formation in water-continuous system. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, vol. 131, pp. 757–771.
18. Siguang Li, Yanjun Li, Longbin Yang, Yang Han, Zhibin Jiang. Prediction of equilibrium conditions for gas hydrates in the organic inhibitor aqueous solutions using a thermodynamic consistency-based model. *Fluid Phase Equilibria*, 2021, vol. 544, pp. 113–118.
19. Aman Z.M., Koh C.A. Interfacial phenomena in gas hydrate systems. *Chemical Society Reviews*. Royal Society of Chemistry, 2016, vol. 45, no. 6, pp. 1678–1690.
20. Korobov G., Podoprigora D. Depth computation for the onset of organic sedimentation formation in the oil producing well as exemplified by the Sibirskoye oil field. *Acta Technica CSAV (Ceskoslovenska Akademie Ved)*, 2018, vol. 63, no. 3, pp. 481–492.
21. Ryo Manabe, Qian Wang, Hong-Quan Zhang, Cem Sarica, Brill J.P. A mechanistic heat transfer model for horizontal two-phase flow. *4th North American Conference on Multiphase Technology*. Denver, 2004, pp. 45–63.
22. Yonghai Gao, Yanchun Cui, Boyue Xu, Baojiang Sun, Xinxin Zhao, Hao Li, Litao Chen. Two phase flow heat transfer analysis at different flow patterns in the wellbore. *Applied Thermal Engineering*, 2017, vol. 117, pp. 544–552.
23. Xuerui Wang, Zhiyuan Wang, Xuejing Deng, Baojiang Sun, Yang Zhao, Weiqi Fu. Coupled thermal model of wellbore and permafrost in Arctic regions. *Applied Thermal Engineering*, 2017, vol. 123, pp. 1291–1299.
24. Cherepovitsyn A.E., Lipina S., Evseeva O. Innovative approach to the development of mineral raw materials of the arctic zone of the Russian Federation. *Journal of Mining Institute*, 2018, vol. 232, pp. 438–444.
25. Cherepovitsyn A.E., Tsvetkov P.S., Evseeva O.O. Critical analysis of methodological approaches to assessing sustainability of arctic oil and gas projects. *Journal of Mining Institute*, vol. 249, no. 5, pp. 463–478.
26. Litvinenko V., Tsvetkov P., Dvoynikov M., Buslaev G. Barriers to implementation of hydrogen initiatives in the context of global energy sustainable development. *Journal of Mining Institute*, 2020, vol. 244, no. 4, pp. 428–438.
27. Aman Z.M., Di Lorenzo M., Kozielski K., Koh C.A., Warrior P., Johns M.L., May E.F. Hydrate formation and deposition in a gas-dominant flowloop: Initial studies of the effect of velocity and subcooling. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2016, vol. 35, pp. 1490–1498.
28. AA-Majid A., Lee W., Srivastava V., Chen L., Grasso G., Vijayamohan P., Chaudhari P., Sloan E.D., Koh C.A. The study of gas hydrate formation and particle transportability using a high pressure flowloop. *Proceedings of the Annual Offshore Technology Conference*. Houston, 2016. Vol. 5, pp. 4447–4460.
29. Koh C.A., Westacott R.E., Zhang W., Hirachand K., Creek J.L., Soper A.K. Mechanisms of gas hydrate formation and inhibition. *Fluid Phase Equilibria*, 2002, vol. 194, pp. 143–151.
30. Schicks J.M., Luzi-Helbing M. Kinetic and thermodynamic aspects of clathrate hydrate nucleation and growth. *Journal of Chemical and Engineering Data*, 2015, vol. 60, no. 2, pp. 269–277.
31. Fandiño O., Ruffine L. Methane hydrate nucleation and growth from the bulk phase: further insights into their mechanisms. *Fuel*, 2014, vol. 117, pp. 442–449.
32. Shidong Zhou, Xiaokang Chen, Chengyuan He, Shuli Wang, Shuhua Zhao, Xiaofang Lv. Experimental study on hydrate formation and flow characteristics with high water cuts. *Energies*, 2018, vol. 11, no. 10, pp. 1–14.
33. Guimin Y., Hao J., Qingwen K. Study on hydrate risk in the water drainage pipeline for offshore natural gas hydrate pilot production. *Frontiers in Earth Science*, 2022, vol. 9, pp. 1–9.
34. Jingbo Gao, Qiang Sun, Zhen Xu, Yu Zhang, Yiwei Wang, Xuqiang Guo, Lanying Yang. Modelling the hydrate formation condition in consideration of hydrates structure transformation. *Chemical Engineering Science*, 2022, vol. 251, pp. 117–129.
35. Wang Y., Hutchinson B.C., Pickarts M.A., Salmin D.C., Srivastava V., Koh C.A., Zepa L.E. Hydrate bedding modeling in oil-dominated systems. *Fuel*, 2021, vol. 289, pp. 119–132.
36. Zhiyuan Wang, Jianbo Zhang, Baojiang Sun, Litao Chen, Yang Zhao, Weiqi Fu. A new hydrate deposition prediction model for gas-dominated systems with free water. *Chemical Engineering Science*, 2017, vol. 163, pp. 145–154.
37. Zhiyuan Wang, Jing Yu, Jianbo Zhang, Shun Liu, Yonghai Gao, Hua Xiang, Baojiang Sun. Improved thermal model considering hydrate formation and deposition in gas-dominated systems with free water. *Fuel*, 2019, vol. 236, pp. 870–879.
38. Zhiyuan Wang, Yang Zhao, Baojiang Sun, Litao Chen, Jianbo Zhang, Xuerui Wang. Modeling of Hydrate Blockage in Gas-Dominated Systems. *Energy and Fuels*, 2016, vol. 30, no. 6, pp. 4653–4666.
39. Zhiyuan Wang, Yang Zhao, Jianbo Zhang, Shaowei Pan, Jing Yu, Baojiang Sun. Flow assurance during deepwater gas well testing: Hydrate blockage prediction and prevention. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2018, vol. 163, pp. 211–216.
40. Khomehchi E., Shamohammadi E., Yousefi S.H. Predicting the hydrate formation temperature by a new correlation and neural network. *Gas Processing Journal*, 2013, vol. 1, no. 1, pp. 41–50.
41. Hongfei Xu, Zeren Jiao, Zhuoran Zhang, Mitchell Huffman, Qingsheng Wang. Prediction of methane hydrate formation conditions in salt water using machine learning algorithms. *Computers and Chemical Engineering*, 2021, vol. 151, pp. 107358–107366.
42. Sizikov A.A., Vlasov V. A., Stoporev A. S., Manakov A. Y. Decomposition kinetics and self-preservation of methane hydrate particles in crude oil dispersions: experiments and theory. *Energy & Fuels*, 2019, vol. 33, no. 12, pp. 12353–12365.
43. Stoporev A.S., Manakov A.Yu., Altunina L.K., Bogoslovsky F.V., Strelets L.A., Aladko E.Ya. Unusual Self-Preservation of Methane Hydrate in Oil Suspensions. *Energy & Fuels*, 2014, vol. 28, no. 2, pp. 794–802.
44. Tananykhin D.S., Struchkov I.A., Khormali A., Roschin P.V. Investigation of the influences of asphaltene deposition on oilfield development using reservoir simulation. *Petroleum Exploration and Development*. *PetroChina*, 2022, vol. 49, no. 5, pp. 1138–1149.
45. Leontaritis K.J. Wax deposition envelope of gas condensates. *Proceedings of the Annual Offshore Technology Conference*. Houston, 1997. Vol. 3, pp. 341–348.
46. Ragnathan T., Husin H., Wood C.D. Wax formation mechanisms, wax chemical inhibitors and factors affecting chemical inhibition. *Applied Sciences (Switzerland)*, 2020, vol. 10, no. 2, pp. 1–18.
47. Adeyanju O.A., Oyekanle L.O. Experimental Study of Wax Deposition in a Single Phase Sub-cooled Oil Pipelines. *Nigeria Annual International Conference and Exhibition*. SPE. Lagos, 2013. pp. 1–18.
48. Sousa A.M., Matos H.A., Guerreiro L. Wax deposition mechanisms and the effect of emulsions and carbon dioxide injection on wax deposition: critical review. *Petroleum*, 2020, vol. 6, no. 3, pp. 215–225.
49. Rocha T.S., Costa G.M., Embiruçu M. Modeling wax appearance temperature. *SPE Latin American and Caribbean Petroleum Engineering Conference*. Quito, 2015. pp. 18–20.
50. Sousa A.L., Matos H.A., Guerreiro L.P. Preventing and removing wax deposition inside vertical wells: a review. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 2019, vol. 9, no. 3, pp. 2091–2107.
51. Nura Makwashi, Donglin Zhao, Mukhtar Abdulkadir, Tariq Ahmed, Ishaka Muhammad. Study on waxy crudes characterisation and chemical inhibitor assessment. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2021, vol. 204, pp. 108734–108750.
52. Khaibullina K.S., Korobov G.Y., Lekontsev A.V. Development of an asphalt-resin-paraffin deposits inhibitor and substantiation of the technological parameters of its injection into the bottom-hole formation zone. *Periodico Tche Quimica*, 2020, vol. 17, no. 34, pp. 769–781.
53. Khaibullina K.S., Sagirova L.R., Sandyga M.S. Substantiation and selection of an inhibitor for preventing the formation of asphalt-

- resin-paraffin deposits. *Periodico Tche Quimica*, 2020, vol. 17, no. , pp. 541–551.
54. Korobov G., Raupov I. Study of adsorption and desorption of asphaltene sediments inhibitor in the bottomhole formation zone. *International Journal of Applied Engineering Research*, 2017, vol. 12, no. 2, pp. 267–272.
 55. Nurgalieva K.S., Saychenko L.A., Riazzi M. Improving the efficiency of oil and gas wells complicated by the formation of asphalt-resin-paraffin deposits. *Energies*, 2021, vol. 14, no. 20, pp. 6673–6689.
 56. Rongbin Li, Qiyu Huang, Xiangrui Zhu, Dongxu Zhang, Yang Lv, Ronald G. Larson. Investigation of delayed formation of wax deposits in polyethylene pipe using a flow-loop. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2021, vol. 196, pp. 108104–108115.
 57. Yudin P.E., Bogatov M.V. Modeling of asphalt-resin-paraffin deposition on the inner surface of tubing pipes with and without coating at a laboratory circulation bench. *Petroleum Engineering*, 2021, vol. 19, no. 2, pp. 97–104.
 58. Bai J., Jin X., Wu J.T. Multifunctional anti-wax coatings for paraffin control in oil pipelines. *Petroleum Science*, 2019, vol. 16, no. 3, pp. 619–631.
 59. Kovrigin L., Kukharchuk I. Automatic control system for removal of paraffin deposits in oil well in permafrost region by thermal method. *Chemical Engineering Research and Design*, 2016, vol. 115, pp. 116–121.
 60. Golubev I., Golubev A. V., Laptev A.B. Practice of using the magnetic treatment devices to intensify the processes of primary oil treating. *Journal of Mining Institute*, 2020, vol. 245, no. 1, pp. 554–560.
 61. Zhu J., Zhang H.Q. A review of experiments and modeling of gas-liquid flow in electrical submersible pumps. *Energies*, 2018, vol. 11, no. 1, pp. 180–221.
 62. Jianjun Zhua, Jiecheng Zhang, Guangqiang Cao, Qingqi Zhao, Jianlin Peng, Haiwen Zhu, Hong-Quan Zhang. Modeling flow pattern transitions in electrical submersible pump under gassy flow conditions. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2019, vol. 180, pp. 471–484.
 63. Merey S., Aydin H., Eren T. Design of electrical submersible pumps in methane hydrate production wells: A case study in Nankai trough methane hydrates. *Upstream Oil and Gas Technology*, 2020, vol. 5, pp. 100023–100037.
 64. Martins J.R., Da Cunha Ribeiro D., De Assis Ressel Pereira F., Ribeiro M.P., Romero O.J. Heat dissipation of the Electrical Submersible Pump (ESP) installed in a subsea skid. *Oil and Gas Science and Technology*, 2020, vol. 75, pp. 1–13.
 65. Lin J. Research on formation prediction model of gas hydrate. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, vol. 651, no. 3, pp. 32–41.
 66. Rogachev M.K., Nguyen Van T., Aleksandrov A.N. Technology for preventing the wax deposit formation in gas-lift wells at offshore oil and gas fields in Vietnam. *Energies*, 2021, vol. 14, no. 16, pp. 5016–5035.
 67. Van Thang N., Thanh Vinh Ph., Rogachev M.K., Korobov G.Yu., Parfenov D.V., Zhurkevich A.O., Islamov Sh.R. A comprehensive method for determining the dewaxing interval period in gas lift wells. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology. Springer International Publishing*, 2023, vol. 13, no. 4, pp. 1163–1179.
 68. Jing-Chun Feng, Yi Wang, Xiao-Sen Li, Zhao-Yang Chen, Gang Li, Yu Zhang. Investigation into optimization condition of thermal stimulation for hydrate dissociation in the sandy reservoir. *Applied Energy*, 2015, vol. 154, pp. 995–1003.
 69. Van T.N., Aleksandrov A.N., Rogachev M.K. An extensive solution to prevent wax deposition formation in gas-lift wells. *Journal of Applied Engineering Science*, 2022, vol. 20, no. 1, pp. 264–275.
 70. Russell Ch., Padula L., Gon S., Pohl E., Neilson A., Sharpe R. Narrowing the gap between laboratory and oilfield using real-time paraffin fouling measurement. *Energy and Fuels*, 2019, vol. 33, no. 6, pp. 5216–5229.
 71. Marsidi Nurul Ashikin, Bak Amir Sani Abdul, Nawi Shakir M.M., Lajawai Maxwell Tommie, Istiyarso Istiyarso, Norhamidi Muhammad Kelly Craig, Gusting Karlos. Re-evaluating the wax flow assurance chemical mitigation strategy for a major deepwater oil pipeline in Malaysia yields significant benefits. *Society of Petroleum Engineers - SPE/IATMI Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition*. Bali, 2019. pp. 1–26.
 72. Mardashov D.V., Rogachev M.K., Zeigman Yu.V., Mukhametshin V.V. Well killing technology before workover operation in complicated conditions. *Energies*, 2021, vol. 14, no. 3, pp. 654–669.
 73. Mardashov D.V. Development of blocking compositions with a bridging agent for oil well killing in conditions of abnormally low formation pressure and carbonate reservoir rocks. *Journal of Mining Institute*, 2021, vol. 251, no. 3, pp. 667–677.
 74. Mardashov D., Bondarenko A., Raupov I. Technique for calculating technological parameters of non-Newtonian liquids injection into oil well during workover. *Journal of Mining Institute*, 2022, vol. 258, pp. 881–894.
 75. Nasir Q., Suleman H., Elsheikh Y.A. A review on the role and impact of various additives as promoters/inhibitors for gas hydrate formation. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2020, vol. 76, pp. 103211–103235.

Received: 14 April 2023.

Reviewed: 22 May 2023.

Information about the authors

Grigory Y. Korobov, Cand. Sc., associate professor, Saint Petersburg Mining University.

Andrey A. Vorontsov, postgraduate student, Saint Petersburg Mining University.

УДК 622.882+622.883 (470+571)

О НЕОБХОДИМОСТИ КОМПЛЕКСНОЙ ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ ТЕХНОГЕННО НАРУШЕННЫХ ГОРНЫМИ РАБОТАМИ ЗЕМЕЛЬ

Гаврилов Владимир Леонидович¹,
gvlugorsk@mail.ru

Немова Наталья Анатольевна^{1,2},
nemova-nataly@mail.ru

Резник Александр Владиславович¹,
a-reznik@mail.ru

Косарев Николай Сергеевич^{1,2},
kosarevnsk@yandex.ru

Колесников Алексей Александрович^{1,2},
alexeykw@yandex.ru

¹ Институт горного дела им Н.А. Чинакала СО РАН,
Россия, 630091, г. Новосибирск, Красный пр., 54.

² Сибирский государственный университет геосистем и технологий,
Россия, 630108, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью систематизировать сведения о способах и порядке получения данных для комплексной геоэкологической оценки техногенно нарушенных территорий исходя из первоначального состояния природных и измененных компонентов окружающей среды с происходящими в них процессами и явлениями. Это позволит получить сведения о территориях, которые необходимы для разработки способов и методов последующей рекультивации техногенно нарушенных земель горными работами.

Цель: анализ методических подходов, позволяющих с использованием различных методов и приёмов генерировать необходимый и достаточный объем первичной и синтезируемой на ее основе требуемой информации, переходить от общей к комплексной и детальной геоэкологической оценке нарушенных и/или планируемых к нарушению горными работами территорий и участков.

Объекты: техногенно нарушенные горными работами территории России в добывающих регионах.

Методы. Был выполнен предварительный отбор материалов, опубликованных в различных изданиях, начиная с 2000 г. Использовались российские (E-library, ВИНТИ РАН) и международные (Scopus, GeoRef) информационные системы, сайты профильных и общенаучных журналов, фонды библиотек, материалы авторов. При формировании запросов применялись в различных комбинациях следующие основные термины и словосочетания: «геоэкологическая оценка», «методы оценки», «техногенно нарушенные территории», «дистанционное зондирование», «состояние окружающей среды». Из более 1000 предварительно выделенных публикаций, преимущественно отечественных, посвященных различным аспектам сбора и получения информации по оценке состояния окружающей среды в горнодобывающих районах, были отобраны более 150. Публикации анализировались с учетом максимально полного представления по регионам и изданиям. Дополнительно использовались материалы, опубликованные федеральными и региональными органами управления и контроля. Наиболее важные и представительные вошли в обзор.

Результаты. Рассмотрены существующие и перспективные методы сбора информации и подготовки к дальнейшей обработке различных видов данных, используемых при геоэкологической оценке техногенно нарушенных горными работами территорий. Обозначены экологические, экономические и социальные проблемы, вызываемые влиянием горных работ, решение которых требует генерации различных видов информации. Сформулирована роль измеряемых в различных шкалах, достоверных и представительных первичных данных для корректной оценки их воздействия на основные компоненты окружающей среды. Рассмотрено влияние условий отработки угольных и рудных месторождений на экологическую обстановку территорий. Показана необходимость применения комплекса методов сбора и обработки информации, подбираемых с учетом особенностей каждой территории освоения и специфики разработки месторождений различных полезных ископаемых.

Ключевые слова:

Окружающая среда, месторождения, полезные ископаемые, горные работы, техногенно нарушенные земли, информация, методы сбора, вскрышиная порода, отходы.

Введение

Удовлетворение запросов постоянно увеличивающегося населения планеты предполагает рост объемов добычи и потребления различных видов полезных ископаемых. Несмотря на ужесточение требований к рациональному, технологически и экономически эф-

фективному, экологически безопасному природо- и недропользованию, количество получаемых отходов и выбросов загрязняющих веществ в окружающую среду (ОС) приводят к появлению серьезных признаков наступающего, как минимум регионального экологического кризиса [1, 2].

На начало 2022 г., по данным Росприроднадзора, площадь нарушенных земель в стране составила 1091,9 тыс. га. Значительная их часть, как и в целом за последние 10 лет, приходилась на земли промышленности. По данным Росстат по состоянию на 2022 г. доля выхлопов, производимых в процессе ведения горных работ по добыче полезных ископаемых, составляла более 42 % от общего объема выбросов загрязняющих атмосферу веществ от стационарных источников.

Имеющиеся темпы и качество восстановления техногенно нарушенных земель были и остаются низкими: по состоянию на 2022 г. в стране рекультивировано всего 139,8 тыс. га [1]. Понимая необходимость преодоления такой неблагоприятной ситуации, государство предпринимает определённые меры. Например, Энергетической стратегией РФ на период до 2035 г. для уменьшения отрицательного воздействия предприятий топливно-энергетического комплекса на ОС декларировано увеличение доли: площади рекультивируемых земель к площади изымаемых для нужд производства с 61,5 % в 2018 г. до 80 % к 2035 г.; утилизированных и обезвреженных отходов в общем объеме образованных отходов, соответственно, с 52,6 до 85 %, в том числе золошлаков с 8,4 до 50 %.

При ведении горных работ экологическую угрозу может представлять вновь образуемая техногенная геосреда, включающая: земли, нарушенные горными предприятиями (карьеры, разрезы, отвалы пород, промплощадки, склады сырья и продуктов обогащения); земли для складирования отходов добычи полезных ископаемых, их обогащения и утилизации (склады, шламо- и хвостохранилища, золоотвалы электростанций и котельных); территории, загрязненные выносами опасных и потенциально опасных веществ с пылью, аэрозолями, растворами; заброшенные объекты хозяйственной деятельности (населенные пункты, не рекультивированные по различным причинам объекты недропользования, промышленные предприятия, складские площадки, места стихийного сбора отходов и мусора).

При отработке месторождений большие площади земель, имеющих различное целевое назначение, ценность и пригодность к восстановлению [3], выводятся из альтернативного оборота на длительные сроки, часть из них даже после технической и биологической рекультивации теряет первоначальные свойства или деградирует полностью [4]. Ведение горных работ, особенно открытых, оказывает негативное влияние на все компоненты ОС. Согласно действующим нормативным документам техногенно нарушенные земли, остающиеся после отработки месторождений горнодобывающими предприятиями, должны быть приведены в экологически безопасное состояние с рекультивацией, ликвидацией ущерба, накопленного за предыдущие периоды, нейтрализацией последствий поступления в экосистемы токсичных веществ, химических, радиоактивных и иных отходов [5–7]. Для этого на землях, техногенно измененных в старопромышленных районах и в районах с текущей и пер-

спективной добычей, необходимо проведение мероприятий по организации прогноза и мониторинга их состояния [8], разработке комплекса критериев, способствующих определению допустимого уровня воздействия на ОС для разных этапов эксплуатации месторождений в разных регионах и для различных видов полезных ископаемых.

Изучение степени воздействия как отдельных источников нарушения и загрязнения, так и всего их комплекса на компоненты ОС является важной научно-практической задачей. Разработка нормативных документов, программ и методов в области взаимодействия человека с ОС и их успешная последующая реализация должны способствовать тому, что одновременно с планами увеличения добычи будут решены и вопросы восстановления и использования нарушенных ландшафтов, сохранения природного разнообразия. Использование максимально полных при текущем уровне развития науки и техники оценок для принятия адаптируемых под условия конкретных месторождений и территорий решений предопределяет экологически сбалансированное развитие добывающих отраслей с исследованием и всесторонней оценкой воздействия горных проектов на компоненты ОС, включая применение систем поддержки принятия решений и определение экологических рисков [5, 9–14].

Для изучения влияния негативных факторов, характерных при освоении месторождений для горнодобывающих районов (деградация земель, развитие карста, суффозии, эрозии, дефляции, загрязнение подземных и поверхностных вод, почвенного и растительного покрова, атмосферного воздуха, нарушение горного массива и др.) в качестве входных параметров мониторинга и управления следует использовать критерии, позволяющие определить уровень техногенной нагрузки. Выбор комплекса методов оценки нарушенной территории зависит от особенностей региона, на территории которого находятся горнодобывающие предприятия, класса опасности продукции и отходов, производимой ими. Оцениваются размеры территорий, подвергающихся техногенному воздействию; нормируются параметры санитарно-защитных зон; определяются границы влияния, загрязнения и превышения предельно допустимых концентраций (ПДК); прогнозируется ожидаемое снижение биологической или экономической продуктивности земель под действием естественных и антропогенных факторов.

Полученные данные позволяют переходить к разработке экологически ориентированных для конкретных условий техногенно нарушенной среды рекомендаций с ранжированием планируемых к использованию мероприятий по эффективности и очередности. Как результат – определение направления устойчивого развития территорий с внедрением наилучших доступных технологий, минимизирующих негативное влияние на ОС горных работ, с возвратом земель в квази первоначальное состояние.

На сегодняшний день имеется большое количество способов и методов получения достоверных и

представительных первичных данных, измеряемых в различных шкалах, для оценки нарушенных территорий с различным уровнем точности. Количество, качество, надежность и представительность информации варьирует от региона к региону. В старопромышленных областях (Урал, Донбасс) наблюдения могут вестись на протяжении ста и более лет, в других районах (Кузбасс, КАТЭК, Кольский полуостров) – в течение десятилетий. Во вновь осваиваемых регионах (Якутия, Крайний Север, Полярный Урал) такие данные могут иметь временной промежуток в несколько лет или отсутствовать. В такой ситуации в каждом регионе целесообразно применение индивидуально настраиваемого комплекса критериев и методов получения исходной информации, достаточной для подготовки и принятия рациональных решений, корректируемых при реализации различных этапов освоения месторождений. Решение рассматриваемого вопроса в рамках межотраслевого и межрегионального взаимодействия позволяет создать надежную информационную, технологическую и научную основу для прогнозирования и обеспечения устойчивого экологического и социально-экономического развития горнодобывающих регионов с максимально возможной реабилитацией геосреды.

Изложенное выше определяет актуальность систематизации сведений о способах и порядке получения данных для всесторонней геоэкологической оценки техногенно нарушенных территорий, исходя из первоначального состояния природных и измененных компонентов ОС с происходящими в них процессами и явлениями. Целью работы является анализ подходов, позволяющих с использованием различных методов и приёмов генерировать необходимый и достаточный объем первичной и синтезируемой на ее основе требуемой информации, переходить от общей к комплексной и детальной геоэкологической оценке нарушенных и/или планируемых к нарушению горными работами территорий и участков.

Материалы и методы исследования

Для максимально полного учёта предлагаемых различными авторами способов и методов получения и обработки разнообразных первичных и производных данных, которые используются для различных геоэкологических оценок нарушенных территорий, целесообразно применять подход, включающий несколько этапов проведения комплексной оценки техногенно нарушенных территорий (рис. 1). Предлагаемый алгоритм использования широкого спектра достоверной информации о измененных территориях (натурные наблюдения, инструментальные и лабораторные исследования, данные инженерно-геологических и экологических изысканий, открытые информационные источники, нормативные документы и др.) позволяет формировать и использовать индивидуально настраиваемый под каждый объект комплекс методов сбора информации, оценки территорий и синтеза рекомендаций с набором мероприятий, ориентированных на непрерывное совершенствование и

эффективность недропользования с минимальными экологическими рисками.



Рис. 1. Алгоритм комплексной геоэкологической оценки техногенно-нарушенных территорий

Fig. 1. Algorithm for a comprehensive geoecological assessment of technogenically disturbed territories

При подготовке статьи был выполнен предварительный отбор материалов, опубликованных в различных изданиях, начиная с 2000 г. Использовались российские (E-library, ВИНТИ РАН) и международные (Scopus, GeoRef) информационные системы, сайты профильных и общенаучных журналов, фонды библиотек, материалы авторов. При формировании запросов применялись в различных комбинациях следующие основные термины и словосочетания: «геоэкологическая оценка», «методы оценки», «техногенно нарушенные территории», «дистанционное зондирование», «состояние окружающей среды». Из более 1000 предварительно выделенных публикаций, преимущественно отечественных, посвященных различным аспектам сбора и получения информации по оценке состояния ОС в горнодобывающих районах, были отобраны более 150.

Публикации анализировались с учетом максимально полного представления по регионам и изданиям. Наиболее важные вошли в обзор. Дополнительно использовались материалы, опубликованные Комитетами по охране ОС, земельным ресурсам и землеустройству, Госкомстатом России и другими органами управления и контроля.

Представленные материалы дополняют опубликованные в последнее время в научных журналах сведения о различных аспектах экологически ориентированного недропользования, акцентируя внимание на необходимости рационального комплексирования и использования всех видов первичных данных, доступных для получения при текущем уровне научно-технического развития [5, 9, 15–20].

Влияние условий отработки угольных и рудных месторождений на экологическую обстановку территорий

Выше отмечалось, что эффективность комплексного подхода к оценке техногенно нарушенных территорий в добывающих регионах зависит от наличия, актуальности, полноты, достоверности и представительности информации о месторождении с прилегающей территорией, способах его освоения. Большое многообразие, сложность и неопределенность условий освоения залежей и связанного с этим техногенного нарушения геосреды и загрязнения ОС ведёт к тому, что на разных объектах недропользования планируемые или используемые подходы при выполнении данных работ могут отличаться друг от друга.

Рассмотрим ряд примеров сбора и использования информации для оценки техногенно нарушенных территорий при разработке угольных и рудных залежей. Отметим также целесообразность использования для этого наземной и космической съемки, геоинформационных систем (ГИС), горно-геологической информационной системы (ГГИС) и веб-технологий, интегрирующих разнородные данные для роста информативности мониторинга горнотехнических объектов, оперативности анализа их состояния, создания баз данных (БД) с информацией для: разработки экологически безопасных технологий освоения территорий, обнаружения видов и причин нарушения земель; классификации видов нарушений; создания тестовых участков нарушенных земель; прослеживания динамики происходящих изменений за определенный промежуток времени и построения карт.

Разработка угольных месторождений. Основным источником поступления в почву токсичных веществ от промышленности является осаждение газопылевых выбросов и сброс сточных вод [21–36], а доминирующими выбросами загрязняющих веществ в атмосферу от подземной разработки являются газообразные вещества (в основном метан) и пылеобразные выбросы от открытой разработки [21, 22]. Вследствие этого, например, на Сагарлыкском породном отвале Бачатского разреза в Кузбассе, основу субстрата которого составляют вскрышные и вмещающие породы, за 20 лет почвообразование не восстановилось и не сформировался растительный покров. Территории такого типа могут практически навсегда сохранять признаки техногенной пустыни, функционирующей в режиме эоклина, как территории, резко отличающейся от естественных природных ландшафтов. На отвалах Кедровского разреза выполнена типизация нарушенных земель по степени их пригодности к рекультивации с выделением: полностью, частично, медленно и практически не восстанавливающихся территорий. Сильное влияние горного производства на атмосферу проявляется в виде выноса пыли, источниками которой являются буровзрывные работы, заборы, технологические дороги, горнотранспортное оборудование, угольные склады, узлы пересыпки угля и горной массы, породные отвалы, котельные. Особую опасность представляет пыль, содержащая токсичные элементы.

Основными загрязнителями, поступающими в реки от Райчихинского разреза (Амурская область), являются, к примеру, взвешенные вещества, нефтепродукты, фенолы, соединения азота, железа, хрома, бария, алюминия, марганца, свинца, ванадия, стронция, меди, цинка. На нарушенных территориях под воздействием дождевых и талых вод происходит процесс естественного выщелачивания металлов с образованием загрязненных стоков. Гидросфера дополнительно загрязняется в результате смыва осевшей пыли, вынесенной из горных пород. Установлено, что на степень загрязнения территорий напрямую влияет их удаленность от источников загрязнения. Оценка воздействия Кангаласского разреза (Якутия) на изменение основных компонентов ландшафтов показала, что в зависимости от расстояния до источников выбросов увеличивается содержание взвешенных веществ, изменяется минеральный состав воды с превышением предельных концентраций по ряду микроэлементов. Зона влияния предприятия зачастую увеличивается за счет прилегающих территорий, используемых им для своих нужд. [27]. Так, в Тульской области техногенные территории, представленные терриконами и отвалами, оказывают также негативное влияние на компоненты ОС. Почвенный анализ по водородному показателю показал, что территории вблизи терриконов относятся к сильнокислым и среднекислым, кислотная фильтрация просачивается в землю, воздействуя на водные ресурсы, а для предотвращения её негативного влияния необходимо проводить мероприятия, нейтрализующие токсичность сульфидосодержащих пород [32]. В Львовско-Волынском угольном бассейне более 70 % отходов, находящихся в терриконах, составляют глинистые аргиллиты, способные задерживать тяжелые металлы, а в сульфидной сере содержатся ртуть и мышьяк. Большое содержание серы в породных отвалах способствует формированию ореолов кислых вод у терриконов, которые, кроме химического загрязнения грунтов, загрязняют и атмосферный воздух.

Золоотвалы тепловых угольных электростанций, являясь частью современной городской среды, занимают определенное место среди различных форм техногенно нарушенных ландшафтов. Общепринятые в почвоведении методы исследования золоотвалов в Новосибирской области позволили сделать вывод о целесообразности проведения мероприятий по рекультивации, т. к. агрохимические свойства почв являются неблагоприятными для самовосстановления нарушенной территории [33].

Компоненты ОС являются объектом дистанционного мониторинга и исследования, при которых можно отслеживать негативное воздействие горного производства на ОС, включающее определение элементного состава почв и загрязняющих веществ в атмосферном воздухе.

Разработка рудных месторождений. В отличие от негативного влияния на компоненты ОС горных работ при разработке угольных месторождений, заключающегося в образовании взвешенных частиц и осаждении газопылевых выбросов, воздействие на

ОС от рудных месторождений заключается в повышенной концентрации тяжелых токсичных металлов в почве и атмосфере, а также вынос этих веществ за пределы прилегающих территорий; в увеличении концентрации рассолов и высокоминерализованных вод в поверхностных водотоках. Например, на Далдынском кимберлитовом поле в Якутии геоэкологическая обстановка определяется повышенными концентрациями хрома, никеля, кобальта, титана, меди, ниобия, лития, бериллия в микроэлементном составе почв, донных отложениях и поверхностных водах; на промышленной площадке Удачинского ГОКа сформировано три полигона захоронения дренажных вод в многолетнемерзлые породы, где наибольшую опасность вызывает риск попадания высокоминерализованных вод в поверхностные водотоки. Фиксировать сброс рассолов в реку можно с использованием дистанционного зондирования, позволяющего отслеживать возможные попадания высокоминерализованных вод в поверхностные водотоки [33]. В Мурманской области из-за наличия в воздухе большого количества загрязняющих веществ погибают леса, а выбросы диоксида серы в районе Норильского промышленного центра приводят к выпадению кислотных дождей. Подобное негативное влияние горнодобывающих предприятий проявляется далеко за их пределами [35]. Аналогичные картины можно наблюдать и в других регионах страны (Приморский край, Урал, Якутия и др.). Оценка воздействия фтор перерабатывающего производства в Забайкалье подтвердила увеличение размеров загрязнения техногенным материалом прилегающих территорий. Отвалы тонкодисперсных отходов руд и вмещающих пород являются источниками загрязнения ОС тяжелыми металлами, которые мигрируют воздушными и водными путями с формированием локальных площадей с высокими концентрациями ряда химических соединений [36].

В старопромышленных добывающих районах, например, на Среднем Урале, техногенное воздействие имеет продолжительный и сложный характер, охватывающий все компоненты ОС. К наиболее существенным негативным последствиям изменения геоэкологической обстановки относятся: трансформация гидродинамических условий; активизация карстовых и оползневых процессов; подтопление, нарушение водного баланса, оседание земной поверхности; загрязнение вод; проявление геодинамических процессов; опустынивание территорий. Для адекватного управления этими процессами необходимо проведение геоинформационного мониторинга, включающего: оборудование наблюдательных пунктов; регулярные опробования; анализ и интерпретацию полученных результатов; оценку и выявление основных источников загрязнения; обоснование управленческих решений для снижения техногенной нагрузки [37]. Комплексный анализ компонентов геологической среды в районе Дегтярского месторождения на Урале показал, что по истечении 25-летнего периода постэксплуатации его территория представляет собой экологически опасную зону, находящуюся, к тому же,

в области питания источника питьевого водоснабжения Екатеринбурга. Территория участка нарушена горными работами, ландшафт классифицирован как опасный природно-техногенный объект [38].

Анализ оценки техногенно нарушенных территорий при отработке угольных и рудных месторождений полезных ископаемых показал, что влияние на ОС в целом является негативным, но параметры этого воздействия различны и поэтому необходимо применять различные методы и критерии оценивания. В такой ситуации использование комплексного методического подхода при оценке техногенно нарушенных территорий при отработке месторождений дает новые направления устойчивого экологически сбалансированного недропользования.

Способы получения исходных данных для геоэкологической оценки территорий

При оценке территорий учитываются социально-экономические, технологические и пространственные факторы исследуемого объекта. Следует отметить важность инженерно-геологических критериев оценки изучаемых объектов и методов прогнозирования последствий геодинамического взаимодействия природной и техногенной сред, детально исследуемых в рамках инженерной геологии. К социально-экономическим можно отнести факторы, которые основываются на взаимодействии общества с ОС и адаптации к изменяющимся внутренним и внешним воздействиям; к технологическим – факторы, учитывающие негативное влияние на ОС. Пространственные служат основой для устойчивого развития социально-экономической системы, позволяющей нормировать антропогенные нагрузки для поддержания нормального функционирования естественных экосистем.

Оценка территории, на которой расположено месторождение и где предусматривается ведение горных работ, предполагает определение её стоимости в соответствии с поставленной целью, являющейся основой для выбора методики оценки. Основными используемыми подходами являются: сравнительный, доходный и затратный. Сущность первого заключается в применении совокупности методов оценки, основанных на определении стоимости объекта путём сравнения изучаемого земельного участка с аналогом; затратный основывается на предположении, что рассматриваемый участок не может стоить больше, чем затраты на мероприятия по восстановлению, охране и защите от потенциальных негативных воздействий на аналогичный участок. Последний метод представляет собой оценку стоимости земельного участка, основанного на определении ожидаемых доходов от его коммерческого использования, когда стоимость участка зависит от величины ожидаемых будущих доходов, а рыночная стоимость определяется на уровне величины эффективного капиталовложения, обеспечивающего доходность, равную доходности данного объекта. Экологическая реабилитация территории существенно влияет на кадастровую и рыночную оценку земель, позволяет учитывать экологиче-

ские, социальные и другие аспекты при обосновании перспективных вариантов дальнейшего использования данной территории.

К критериям оценки, по которым определяется уровень техногенной нагрузки, относятся: коэффициент экологической стабильности, индекс сбалансированности, фактор стабилизации, соответствие технологической нагрузки экологической ёмкости ландшафта [39], степень фитотоксичности почв, экологические шкалы Л.Г. Раменского [40], нормализованный разностный вегетационный индекс NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) [16], немецкий экологический индекс DUX (Deutscher Umwelt Index) [41], степень поврежденности лесонасаждений, интегральный показатель состояния нарушенных земель [42], критерий нетронутости экологических систем [30], индексы социального, экономического развития, напряженности экологической ситуации [43] и др.

Использование ретроспективных данных, включающих физико-географические и природно-климатические условия, первоначальное состояние и категории земель, их промышленное использование, площадь нарушенности, позволяет на первоначальном этапе оценки техногенно измененных территорий дать необходимую информацию для составления информационно-аналитических БД, дополняемых мощными возможностями ГИС, ГГИС для отстраивания с их помощью карт инженерно-геологического, эколого-экономического и иного районирования. Комплексное использование этих инструментов позволяет получать своевременную и достоверную информацию о состоянии земель, их количественных и качественных характеристиках для подготовки и принятия управленческих решений о размещении горнодобывающих объектов и минимизации воздействия на ОС [44]. Картирование опасности объектов горнодобывающей отрасли позволяет ранжировать предприятия по основным индексам и численным значениям геоэкологических индикаторов [43].

Для оценки техногенно нарушенных территорий используется постоянно расширяющийся спектр методов, приёмов и способов. Он включает: визуальные (картометрические, полевые, органолептические), инструментальные (тахеометрическая съёмка, стереофотограмметрический метод, наземное лазерное сканирование), лабораторные (элементный и механический анализ, морфологический метод изучения грунтов, изучение минералогического состава) и дистанционные (аэро- и спутниковые, стереометрические съёмки). Разнообразные методы компьютерного моделирования и обработки данных позволяют на основе первичных и производных от них сведений анализировать дистанционные снимки, полученные с применением различных технологий, строить цифровые карты, ортофотопланы, создавать цифровые модели техногенно измененных территорий с различной детальностью и точностью, выполнять их кластеризацию по заданным критериям.

Анализ опыта их использования показывает, что применение только одного из методов, как правило, не даёт полной картины о нейтральности или нега-

тивности воздействию техногенно нарушенных территорий на компоненты ОС. Использование, например, только полевых и инструментальных методов диагностики позволят определять загрязнение территорий и оценить функциональное состояние экосистемы. Представление о границах этих загрязнений даёт составление карт. А лабораторные исследования формируют наши представления об элементном составе и физико-механических свойствах минерального сырья, пород и грунтов, их морфологии [45].

Визуальными наблюдениями могут выявляться объекты воздействия различных технологий, транспорта и коммуникаций, вызывающих нарушения земель и изменения состояния ОС. Визуализация сводится не только к определению границ нарушений или техногенного ландшафта, но и к определению зон деградации и опустынивания земель, территорий, подверженных повышенному загрязнению атмосферного воздуха, подземных и поверхностных вод, почв и зон смещения горных пород.

Инструментальные исследования заключаются в полевом измерении выделения газов и пыли; определении предельно допустимых концентраций вредных примесей; фото- и лазерном сканировании для создания геолого-структурных моделей нарушенных территорий с геодезической привязкой и тахеометрической съёмкой; использовании стереофотограмметрического метода для определения метрической характеристики объектов и их положения, позволяющего с высокой точностью и достоверностью готовить горно-графическую документацию; получение объёмного плана техногенно нарушенных территорий. Применение тепловизоров позволяет получить инфракрасные изображения с распределением температур исследуемой поверхности по всей площади, что, в свою очередь, может служить инструментом мониторинга на каждом этапе технологического процесса горного производства.

Лабораторные исследования необходимы для определения микробиологического состояния флоры территорий по показателям: плодородие, содержание гумуса, площадь вторично засоленных почв, глубина смытости почвенных горизонтов, площадь обнаженных коренных пород, площадь ветровой эрозии, задернованность песчаных почв, уровень активной микробной биомассы, содержания общего азота, хлоридов, хлорофоса, хлорамина, метанола, мышьяка, тяжелых фенолов, сернистых соединений, цианидов, радиоактивных веществ, различных микроорганизмов, определение кислотности и щелочности, определение техногенного загрязнения и др. На основании данных, полученных в результате почвенных исследований, составляется паспорт почвы, содержащий фиксированный набор данных, необходимых для целей ее рационального использования и охраны.

Инженерно-геологические изыскания и экологический мониторинг позволяют систематизировать информацию о физико-механических свойствах грунтов и пород.

Ориентация на геопространственные данные способствует разработке методологических подходов,

алгоритмов и методик анализа, математических моделей для аналогичных проектов, а использование технологий искусственного интеллекта дает толчок для более полной цифровой трансформации решаемых задач. В рамках дистанционных наблюдений возможны прогнозы состояния земель, содержащие расчетный [46], теоретический и картографический материал, характеристику нарушенных земель, получаемую с помощью инженерно-геологических изысканий и экологического мониторинга. На основе прогнозов можно разрабатывать рекомендации, включающие мероприятия, направленные на улучшение качественного состояния земель, например, связанных с защитой почв от эрозии и селевых потоков.

На основе данных аэро- и космоснимков можно: выделять участки природных комплексов, трансформированных различными видами хозяйственной деятельности; осуществлять построение камеральных версий карт, содержащих слои специализированной информации, иллюстрирующие полученные в ходе интерпретации снимков предварительные выводы [47]; определять площади нарушенных территорий с оценкой возможности их самовосстановления и самозарастания, антропогенную изменчивость, уровень деградации почв, зоны выносы опасных и особо опасных веществ.

Использование комплексного подхода к оценке воздействия объектов накопленного вреда и загрязнения земель позволяет использовать не только современные цифровые методы интерпретации данных, но и интегрировать в исследования ретроспективные сведения о состоянии территорий промышленного освоения. Необходимо осуществлять мониторинг ОС горнопромышленных территорий в постэксплуатационный период, так как на подобных участках может происходить активизация опасных геологических, геохимических и геодинамических процессов. Метод, основанный на принципах эколого-географического картографирования, даёт возможность системно рассматривать антропогенные факторы формирования территориальной экологической обстановки. Изучение разнородной информации и проведение комплексных эколого-географических оценок базируется на статистических данных изучаемой территории, дополняемых картографическим «подкреплением», позволяющим осмыслить территориальные аспекты проблем качества ОС. Карта выступает наглядным и доступным результатом проводимых территориальных исследований [48].

Междисциплинарный характер проблемы предполагает учёт результатов исследований в различных научных областях для совершенствования теоретических подходов и методологии комплексного управления процессами рационального экологически сбалансированного взаимодействия природных и технических систем [49–57].

Рассмотренные в обзоре методы сбора, подготовки и обработки различных видов данных позволяют на более высоком качественном уровне перейти к оценке состояния и рисков нерационального использования месторождений и техногенно изменённых территорий. Логика развития исследований связана с

постепенным движением: 1) изучение природного потенциала месторождений [58] и связанных с их освоением прилегающих территорий; 2) выявление особенностей постоянно изменяющегося во времени геопространства на основе разномасштабного 2D- и 3D-моделирования территорий и их локальных участков (месторождений, пластов, рудных зон, отвалов, складов) на основе высокоточного позиционирования, геометризации и кластеризации [59]; 3) определение тенденций развития технологий изменения земель и недр с оценкой реальных и потенциальных рисков нарушения природной среды; 4) оценка состояния и рисков использования техногенно изменённых или планируемых к формированию территорий при добыче, переработке и утилизации полезных ископаемых территорий; 5) разработка механизмов ресурсосберегающего технологически, экологически и экономически сбалансированного природо- и недропользования на землях различного назначения, ценности и пригодности к естественному или искусственному восстановлению.

Выводы

Важным способом снижения негативного воздействия горных работ на компоненты ОС является улучшение качества принимаемых и реализуемых решений, ориентированных на снижение разнообразных геоэкологических рисков. Основой для оценки состояния техногенно нарушаемых земель является разнообразная постоянно актуализируемая ретроспективная и текущая первичная и синтезированная информация об исходном состоянии территорий хозяйственного освоения.

Для совершенствования информационных ресурсов и унифицированного доступа к ним целесообразно формировать постоянно пополняемые БД, являющиеся информационно-аналитической основой для решения различных задач геоэкологической оценки техногенно изменённых горными работами территорий. БД должны настраиваться под решение конкретных задач с постоянной интеграцией в них новых видов информации и последующим созданием на этой основе баз знаний и систем поддержки принятия решений.

Максимально объективная системная оценка текущего уровня и прогнозного состояния техногенно нарушенных горными работами территорий достигается использованием индивидуально настраиваемых под конкретные объекты и условия методов инструментальных, полевых, лабораторных и модельных цифровых исследований, совершенствуемых по мере развития науки и практики.

Сведения, полученные такой системной оценкой, необходимы для разработки документов долгосрочного планирования и текущего управления с перечнем мероприятий, обеспечивающих эффективное, устойчивое и экологически сбалансированное недропользование.

Следует учитывать тот факт, что одной из основных проблем при решении задач восстановления и возвращения в хозяйственный оборот нарушенных

земель было и остаётся несовершенство регулирующих данные вопросы правовой базы, где большая часть существующих нормативно-правовых актов посвящена проблемам использования и охраны земель, а не их восстановлению.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Трубецкой К.Н., Галченко Ю.П. Экологические аспекты технологической парадигмы минерально-сырьевого комплекса при устойчивом развитии природы и общества // Известия ТулГУ. Науки о земле. – 2022. – Вып. 1. – С. 18–38.
2. Michieka N.M. Energy and the environment: the relationship between coal production and the environment in China // Natural Resources Research. – 2014. – V. 23. – № 2. – P. 285–298. DOI: 10.1007/s11053-013-9223-7.
3. О нарушении земель при освоении МСБ восточной части Новосибирской области / В.П. Гаврилов, Н.А. Немова, А.В. Резник, Н.С. Косарев, М.И. Смык, К.Е. Медведева // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. – 2022. – Т. 9. – № 2. – С. 69–77.
4. Анализ экологических проблем в угледобывающих районах / О.М. Зиновьева, Л.А. Колесникова, А.М. Меркулова, Н.А. Смирнова // Уголь. – 2020. – № 10. – С. 62–67.
5. Техногенное воздействие на окружающую среду в Российской Арктике на примере Норильского промышленного района / Н.В. Юркевич, И.Н. Ельцов, В.Н. Гуреев, Н.А. Мазов, Н.В. Юркевич, А.В. Еделев // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 12. – С. 230–249.
6. Assessment of surface ecological quality of grassland mining area and identification of its impact range / Aman Fang, Menghe Bao, Weiqiang Chen, Jihong Dong // Natural Resources Research. – 2021. – V. 30. – № 5. – P. 3819–3837. DOI: org/10.1007/s11053-021-09868-8
7. A coupling method for eco-geological environmental safety assessment in mining areas using PCA and catastrophe theory / Xiaofei Sun, Huaiyong Shao, Xiaoyu Xiang, Linguo Yuan, Yingzhi Zhou, Wei Xian // Natural Resources Research. – 2020. – V. 29. – № 6. – P. 4133–4148. DOI: org/10.1007/s11053-020-09682-8
8. Карпукhin С.С., Бровко Е.А., Игнатьев В.Ф. Аэрокосмическое и картографическое обеспечение экологического мониторинга территорий интенсивного недропользования // Маркшейдерский вестник. – 2004. – № 4. – С. 52–56.
9. Environmental impact assessment based on group decision-making methods in mining projects / N. Rikhtegar, N. Mansouri, A.A. Oroumieh, A. Yazdani-Chamzini, E.K. Zavadskas, S. Kildienė // Economic Research-Ekonomika Istraživanja. – 2014. – V. 27. – № 1. – P. 378–392.
10. Jordan G., Abdaal A. Decision support methods for the environmental assessment of contamination at mining sites // Environ Monit. – 2013. – V. 185. – P. 7809–7832. DOI: ORG/10.1007/S10661-013-3137-Z.
11. Ecological risk assessment of land destruction in large open-pit mine / Sun Qi, Bai Zhongke, Cao Yingui, Xie Miaomiao, Hu Xingding, Jiang Yanzhu, Lu Yuanqing // Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering. – 2015. – V. 31. – № 17. – P. 278–288. DOI: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.17.03
12. Chang Qing, Liu Dan, Liu Xiaowen. Ecological risk assessment and spatial prevention strategy of land damage in mining cities // Chinese Journal of Agricultural Engineering. – 2013. – V. 20. – P. 245–254. DOI: 10.3969/j.issn.1002-6819.2013.20.032.
13. Future scenarios of environmental vulnerability mapping using grey analytic hierarchy process / S. Sahoo, A. Dhar, A. Debsarkar et al. // Natural Resources Research. – 2019. – V. 28. – № 4. – P. 1461–1483. DOI: org/10.1007/S11053-019-09462-z
14. Prasad G., Ramesh M.V. Spatio-temporal analysis of land use/land cover changes in an ecologically fragile area – Alappuzha District, Southern Kerala, India // Natural Resources Research. – 2019. – V. 28. – № S1. – P. 31–42. DOI: org/10.1007/s11053-018-9419-y
15. Reclamation of waste storage sites of the mining industry in the Russian Federation / A.V. Edelev, N.V. Yurkevich, V.N. Gureev, N.A. Mazov // Journal of Mining Science. – 2022. – V. 58. – № 6. – P. 168–186. DOI: 10.15372/FTPRP120220618
16. Ostapenko S.P., Mesyats S.P. Recovery dynamics of mining-altered natural ecosystems by satellite data // Journal of Mining Science. – 2022. – V. 58. – № 5. – P. 155–166. DOI: 10.1134/S1062739122050155
17. Васильев С.М. и др. Обзор основных методов и способов оценки нарушенных земель сельскохозяйственного назначения с использованием данных дистанционного зондирования. – Новочеркасск: Изд-во ВИНТИ РАН, 2018. – 65 с.
18. Оценка пылеаэрозольного загрязнения в зоне влияния цементного завода на основе изучения снегового покрова (Новосибирская область) / Д.А. Володина, А.В. Таловская, Е.Г. Язиков, А.Ю. Девятова, А.В. Еделев // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333. – № 10. – С. 69–85.
19. Казбулатова Г.М., Мичурин С.В., Карамова А.М. Геоэкологическая оценка состояния поверхностных вод Авзянского золоторудного района республики Башкортостан // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333. – № 8. – С. 139–152.
20. Высоцкий С.П., Козырь Д.А. Экологический мониторинг породных отвалов горнопромышленных агломераций // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 11. – С. 37–46.
21. Трапезникова И.С. Эколого-экономическая оценка территорий (на примере Кемеровской области) // Экономика природопользования. – 2010. – № 4. – С. 74–78.
22. Степанов Ю.А., Часовников С.Н., Корчагина Т.В. Оценка экологической ситуации в Кемеровской области при воздействии техногенных массивов // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2006. – № 2 (66). – С. 50–54.
23. Харина Г.В., Алешина Л.В. Аккумуляция тяжелых металлов в почвах Свердловской области // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333. – № 2. – С. 173–183.
24. Шабанов М.В., Маричев М.С. Геохимические аномалии тяжелых металлов в почвах при родных и антропогенных ландшафтах (на примере Красноуральского промузла) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333. – № 6. – С. 230–239.
25. Investigation of environmental-concern trace elements in coal and their combustion residues from thermal power plants in Eastern India / D. Saha, D. Chatterjee, S. Chakravarty et al. // Natural Resources Research. – 2019. – V. 28. – № 4. – P. 1505–1520. DOI: ORG/10.1007/S11053-019-09451-2
26. Ramazanov E., Seung Hwan Lee, Woojin Lee. Stochastic risk assessment of urban soils contaminated by heavy metals in Kazakhstan // Science of the Total Environment. – 2021. – V. 750. DOI: ORG/10.1016/J.SCITOTENV.2020.141535.
27. Ноговицын Д.Д., Николаева Н.А., Шеина З.М. Комплексная оценка воздействия Кангаласского угольного разреза на состояние природной среды // Наука и образование. – 2006. – № 2. – С. 73–78.
28. Chabukdhara M., Singh O.P. Coal mining in northeast India: an overview of environmental issues and treatment approaches // International Journal of Coal Science & Technology. – 2016. – № 3 (2). – P. 87–96. DOI: org/10.1007/s40789-016-0126-1
29. Chugh Y.P., Behum P.T. Coal waste management practices in the USA: an overview // International Journal of Coal Science & Technology. – 2014. – № 1 (2). – P. 163–176. DOI: org/10.1007/s40789-014-0023-4
30. Грязнов О.Н., Елохина С.Н. Геоэкологические критерии оценки золоотвалов на тепловых электростанциях в пределах Уральского региона // Известия Вузов. Горный журнал. – 2005. – № 6. – С. 32–39.
31. Мусихина Е.А., Головнева Т.И. Задача комплексной оценки антропогенного загрязнения почв на территории Иркутской области // Экологические риски и экономические ущербы. – 2008. – № 3. – С. 73–76.

32. Киреева А.С. Современное состояние и экологическая оценка влияния породных отвалов предприятий угольной промышленности // Известия ТулГУ. Науки о Земле. – 2022. – Вып. 1. – С. 62–71.
33. Коротченко И.С., Первышина Г.Г., Мучкина Е.Я. Воздействие процесса сжигания углей Ирша–Бородинского разреза на депонирование тяжелых металлов в почве (на примере Минусинской ТЭЦ) // Уголь. – 2020. – № 6. – С. 67–69.
34. Легостаева Я.Б., Гололобова А.Г. Особенности распределения микроэлементов в почвах фоновых и импактных зон на участках алмазодобычи на Северо-Западе Сибирской платформы // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 9. – С. 142–153.
35. Лукьянова Н.В., Мясков А.В. Влияние горной промышленности на особо охраняемые природные территории // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2007. – № 6. – С. 323–330.
36. Михайленко В.Н. Исследование характера загрязнения территории Забайкалья техногенными отходами горного производства // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2008. – № 3. – С. 151–154.
37. Геоинформационный мониторинг для решения экологических задач горнопромышленных территорий Среднего Урала / С.В. Корнилов, Л.С. Рыбникова, П.А. Рыбников, А.Ю. Смирнов // Горная промышленность. – 2022. – № 1S. – С. 127–133.
38. Елохина С.Н., Киндлер А.А. Мониторинг состояния недр в период горнопромышленной постэксплуатации на Урале (Дегтярский участок) // Известия Уральского государственного горного университета. – 2020. – Вып. 1 (57). – С. 105–117. DOI: 10.21440/2307-2091-2020-1-105-117.
39. Евтушкова Е.П. Экологическое состояние земель сельскохозяйственного назначения на юге Тюменской области // Агропродовольственная политика России. – 2016. – № 12 (60). – С. 51–53.
40. Бузук Г.Н. Экологические шкалы Л.Г. Раменского: новые возможности // Бюллетень Брянского отделения РБО. – 2018. – № 1 (13). – С. 37–43.
41. Гридин В.Г., Чамкина Т.И. Показатели устойчивого развития и оценка с их помощью состояния окружающей среды Кузбасса // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2007. – № 12. – С. 180–191.
42. Куприянов А.Н., Манаков Ю.А. Интегральный показатель состояния нарушенных земель после добычи угля // Вестник КрасГАУ. – 2010. – № 3. – С. 29–35.
43. Kalabin G.V. Ecological sustainability indicators of the mining industry areas in Russia // Journal of Mining Science. – 2020. – V. 56. – № 3. – P. 175–183.
44. Гамм Т.А., Калиев А.Ж. Дифференциация территории по экологическим показателям техногенной нагрузки // Вестник Оренбургского государственного университета. – 2004. – № 9. – С. 98–101.
45. Hsai-Yang Fang, Chaney R.C. Introduction to environmental geotechnology // Taylor and Francis Group. – 2016. – P. 726. DOI: ORG/10.1201/9781315374734
46. Использование результатов дистанционного зондирования в оценке восстановления экосистемы на территориях с открытой угледобычей в регионах Урала / И.В. Зеньков, Ю.П. Юроен, Г.А. Карачева, О.О. Стукова, В.Н. Вокин, Е.В. Кирюшина, Ж.В. Миронова, Т.А. Веретенова // Уголь. – 2020. – № 10. – С. 68–71.
47. Makarov D.V., Konina O.T., Goryachev A.A. Dusting suppression at tailings storage facilities // Journal of Mining Science. – 2021. – V. 57. – № 4. – P. 160–170.
48. Пономаренко М.Р., Кутепов Ю.И., Шабаров А.Н. Информационно-аналитическое обеспечение мониторинга состояния объектов открытых горных работ на базе технологий веб-картографии // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 8. – С. 56–70.
49. Шипилова А.М., Семина И.С. Оценка почвенно-экологического состояния техногенных ландшафтов Кузбасса в зависимости от технологии рекультивации нарушенных земель // Известия Уральского государственного горного университета. – 2017. – № 3. – С. 53–56.
50. Сенченко Д.С. Основные критерии оценки нарушенных горным производством земель для проведения учебно-рекреационной рекультивации // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2008. – № 11. – С. 153–159.
51. Mel'nikov N.N., Mesyats S.P., Volkova E.Yu. Methodological approach to restoration of ecosystem functions in the industrially generated lands // Journal of Mining Science. – 2014. – V. 50. – P. 190–198.
52. Hao Bing-yuan, Kang Li-Xun. Mine land reclamation and eco-reconstruction in Shanxi Province I: mine land reclamation model // The Scientific World Journal. – 2014. – V. 1. – P. 1–9. DOI: 10.1155/2014/483862.
53. Loures L., Panagopoulos T. Sustainable reclamation of industrial areas in urban landscapes // Transactions on Ecology and the Environment. – 2007. – V. 102. – P. 791–800. DOI: 10.2495/SDP070752.
54. Bascetin A. A decision support system using analytical hierarchy process (AHP) for the optimal environmental reclamation of an open-pit mine // Environ Geol. – 2007. – V. 52. – P. 663–672. DOI: org/10.1007/s00254-006-0495-7.
55. Mapping the timing of cropland abandonment and recultivation in northern Kazakhstan using annual Landsat time series / A. Dara, M. Baumann, T. Kuemmerle, D. Pflugmacher, A. Rabe, N. Hölzel, J. Kamp, M. Freitag, P. Hostert // Remote sensing of environment. – 2018. – V. 213. – P. 49–60. DOI: org/10.1016/j.rse.2018.05.005.
56. Ecological restoration uncontaminated soils of Kokdzhon phosphate mining area (Zhambyl region, Kazakhstan) / M. Toktar, G. lo Papa, F.E. Kozybayeva, C. Dazzi // Ecological Engineering. – 2016. – V. 86. – P. 1–4. DOI: org/10.1016/j.ecoleng.2015.09.080.
57. Alavi I., Ebrahimabadi A., Hamidian H. Choosing the most proper plant types in reclamation of an open-pit mine // Journal of Mining Science. – 2022. – V. 58. – № 1. – P. 170–181.
58. Немова Н.А., Резник А.В., Карпов В.Н. Моделирование процесса восстановления земель как часть цифровизации месторождений // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2021. – Т. 2. – № 3. – С. 322–331.
59. Trofimetz L.N., Panidi E.A., Kikin P.M. Integration of data of the remote sensing, GIS, and gamma-spectrometric analysis to study soil material redistribution // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. V. XLIII-B4-2021XXIV ISPRS Congress (2021 ed.). – Nice, France, 2021. – V. 43. – P. 147–152.

Поступила: 28.04.2023 г.

Прошла рецензирование: 18.05.2023 г.

Информация об авторах

Гаврилов В.Л., кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории открытых горных работ, Институт горного дела им Н.А. Чинакала СО РАН.

Немова Н.А., кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории открытых горных работ, Институт горного дела им Н.А. Чинакала СО РАН; доцент кафедры маркшейдерского дела и геодезии, Сибирский государственный университет геосистем и технологий.

Резник А.В., кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории открытых горных работ, Институт горного дела им Н.А. Чинакала СО РАН.

Косарев Н.С., кандидат технических наук, доцент кафедры маркшейдерского дела и геодезии, Сибирский государственный университет геосистем и технологий; старший научный сотрудник лаборатории открытых горных работ, Институт горного дела им Н.А. Чинакала СО РАН.

Колесников А.А., кандидат технических наук, доцент кафедры картографии и геоинформатики, Сибирский государственный университет геосистем и технологий; старший научный сотрудник лаборатории открытых горных работ, Институт горного дела им Н.А. Чинакала СО РАН.

UDC 622.882+622.883 (470+571)

ON THE NEED FOR A COMPREHENSIVE GEOECOLOGICAL ASSESSMENT OF LANDS DISTURBED BY MINING

Vladimir L. Gavrilov¹,
gvlugorsk@mail.ru

Natalya A. Nemova^{1,2},
nemova-natalya@mail.ru

Alexander V. Reznik¹,
a-reznik@mail.ru

Nikolay S. Kosarev^{1,2},
kosarevnsk@yandex.ru

Aleksey A. Kolesnikov^{1,2},
alexeykw@yandex.ru

¹ Chinakal Institute of Mining SB RAS,
54, Krasny avenue, Novosibirsk, 630091, Russia.

² Siberian State University of Geosystems and Technologies,
10, Plakhotny street, Novosibirsk, 630108, Russia.

The relevance of the study is caused by the need to systematize information on the methods and procedure for obtaining data for a comprehensive geoecological assessment of territories disturbed by mining, based on the initial state of natural and modified components of the environment with the processes and phenomena occurring in it. This enables us to obtain information about the territories required for the development of methods and techniques for the subsequent reclamation of lands disturbed by mining.

Objective: using various methods and techniques, to analyze methodological approaches that allow generating the necessary and sufficient volume of primary and required information synthesized on its basis, to proceed from a general to a comprehensive and detailed geoecological assessment of territories and areas disturbed and/or planned to be disturbed by mining operations.

Objects: Russian territories in mining regions disturbed by mining operations.

Methods. Pre-selection of materials published since 2000 was carried out. Russian (E-library, VINITI RAS) and international (Scopus, GeoRef) information systems, websites of specialized and general scientific journals, library collections, and authors' materials were used. When querying, the following basic terms and phrases were used in various combinations: «geoecological assessment», «assessment methods», «territories disturbed by mining», «remote sensing», «environmental condition». Of more than 1000 pre-identified publications, mostly Russian, devoted to various aspects of collecting and obtaining information on assessing the environmental condition in mining areas, more than 150 were selected. Publications were analyzed taking into account the most complete representation by region and publication. Additionally, materials published by federal and regional management and control authorities were used. The most important and representative ones were included in the review.

Results. Existing and promising methods for collecting various data used in the geoecological assessment of territories disturbed by mining are considered. If required, these data will be further processed. Environmental, economic and social problems caused by the influence of mining operations are identified, the solution of these problems requires the generation of various information. The role of reliable and representative primary data measured on various scales is formulated to make a correct assessment of their impact on basic environmental components. The influence of the conditions of mining coal and ore deposits on environmental situation of the territories is considered. The necessity of using a set of methods for collecting and processing information, selected with regard to peculiarities of each mining area and mining specifics of various mineral deposits, is shown.

Key words:

Environment, deposits, minerals, mining operations, lands disturbed by mining, information, collection methods, overburden, waste.

The research was carried out at the expense of the Russian Science Foundation grant no. 23-27-10057 and the NSO grant no. r-60 «Development of a methodology for assessing the condition of technogenically disturbed lands in the Novosibirsk region and forecasting directions for their alternative use».

REFERENCES

1. Trubetskoy K.N., Galchenko Yu.P. Environmental aspects of the technological paradigm of the mineral and raw resources complex under a sustainable development of nature and society. *News of the Tula state university. Sciences of Earth*, 2022, vol. 1, pp. 18–38. In Rus.
2. Michieka N.M. Energy and the environment: the relationship between coal production and the environment in China. *Natural Resources Research*, 2014, vol. 23, no. 2, pp. 285–298. DOI: 10.1007/s11053-013-9223-7.
3. Gavrilov V.L., Nemova N.A., Reznik A.V., Kosarev N.S., Smyk M.I., Medvedeva K.E. On the violation of land during the development of SMEs in the eastern part of the Novosibirsk Region. *Fundamental and applied issues of mining sciences*, 2022, vol. 9, no. 2, pp. 69–77. In Rus.
4. Zinovieva O.M., Kolesnikova L.A., Merkulova A.M., Smirnova N.A. Analysis of environmental problems in coal mining areas. *Ugol*, 2020, no. 10, pp. 62–67. In Rus.

5. Yurkevich N.V., Eltssov I.N., Gureev V.N., Mazov N.A., Yurkevich N.V., Edelev A.V. Technogenic impact on the environment in the Russian Arctic on the example of the Norilsk industrial region. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 12, pp. 230–249. In Rus.
6. Aman Fang, Menghe Bao, Weiqiang Chen, Jihong Dong. Assessment of surface ecological quality of grassland mining area and identification of its impact range. *Natural Resources Research*, 2021, vol. 30, no. 5, pp. 3819–3837. DOI: org/10.1007/s11053-021-09868-8
7. Xiaofei Sun, Huaiyong Shao, Xiaoyu Xiang, Linguo Yuan, Yingzhi Zhou, Wei Xian. A coupling method for eco-geological environmental safety assessment in mining areas using PCA and catastrophe theory. *Natural Resources Research*, 2020, vol. 29, no. 6, pp. 4133–4148. DOI: org/10.1007/s11053-020-09682-8
8. Karpukhin S.S., Brovko E.A., Ignatiev V.F. Aerospace and cartographic support of ecological monitoring of areas of intensive subsoil use. *Mine Surveying Bulletin*, 2004, no. 4, pp. 52–56. In Rus.
9. Rikhtegar N., Mansouri N., Oroumieh A.A., Yazdani-Chamzini A., Zavadskas E.K., Kildienė S. Environmental impact assessment based on group decision-making methods in mining projects. *Economic Research-Ekonomska Istraživanja*, 2014, vol. 27, no. 1, pp. 378–392.
10. Jordan G., Abdaal A. Decision support methods for the environmental assessment of contamination at mining sites. *Environ Monit*, 2013, no. 185, pp. 7809–7832. DOI: ORG/10.1007/S10661-013-3137-Z.
11. Sun Qi, Bai Zhongke, Cao Yingui, Xie Miaomiao, Hu Xingding, Jiang Yanzhu, Lu Yuanqing. Ecological risk assessment of land destruction in large open-pit mine. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, vol. 31, no. 17, pp. 278–288. DOI: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.17.03
12. Chang Qing, Liu Dan, Liu Xiaowen. Ecological risk assessment and spatial prevention strategy of land damage in mining cities. *Chinese Journal of Agricultural Engineering*, 2013, vol. 20, pp. 245–254. DOI: 10.3969/j.issn.1002-6819.2013.20.032.
13. Sahoo S., Dhar A., Debsarkar A. Future scenarios of environmental vulnerability mapping using grey analytic hierarchy process. *Natural Resources Research*, 2019, vol. 28, no. 4, pp. 1461–1483. DOI: org/10.1007/S11053-019-09462-z
14. Prasad G., Ramesh M.V. Spatio-temporal analysis of land use/land cover changes in an ecologically fragile area – Alappuzha District, Southern Kerala, India. *Natural Resources Research*, 2019, vol. 28, no. S1, pp. 31–42. DOI: org/10.1007/s11053-018-9419-y
15. Edelev A.V., Yurkevich N.V., Gureev V.N., Mazov N.A. Reclamation of waste storage sites of the mining industry in the Russian Federation. *Journal of Mining Science*, 2022, vol. 58, no. 6, pp. 168–186. In Rus. DOI: 10.15372/FTP20220618
16. Ostapenko S.P., Mesyats S.P. Recovery dynamics of mining-altered natural ecosystems by satellite data. *Journal of Mining Science*, 2022, vol. 58, no. 5, pp. 155–166. In Rus. DOI: 10.1134/S1062739122050155
17. Vasiliev S.M. *Obzor osnovnykh metodov i sposobov otsenki narushennykh zemel sel'skhozozhaystvennogo naznacheniya s ispol'zovaniem dannykh distantsionnogo zondirovaniya* [Overview of the main methods and methods for assessing disturbed agricultural land using remote sensing data]. Novocherkassk, VINITI RAN Publ., 2018. 65 p.
18. Volodina D.A., Talovskaya A.V., Yazikov E.G., Devyatova A.Yu., Edelev A.V. Assessment of dust and aerosol pollution in the zone of influence of the cement plant based on the study of snow cover (Novosibirsk region). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, no.10, pp. 69–85. In Rus.
19. Kazbulatova G.M., Michurin S.V., Karamova A.M. Geoecological assessment of the state of surface waters of the Avzyansky gold mining region of the Republic of Bashkortostan. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, no. 8, pp. 139–152. In Rus.
20. Vysotsky S.P., Kozyr D.A. Environmental monitoring of waste dumps of mining agglomerations. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 11, pp. 37–46. In Rus.
21. Trapeznikova I.S. Ecological and economic assessment of territories (on the example of the Kemerovo region). *Economics of Nature Management*, 2010, no. 4, pp. 74–78. In Rus.
22. Stepanov Yu.A., Chasovnikov S.N., Korchagina T.V. Assessment of the ecological situation in the Kemerovo region under the influence of man-made massifs. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*, 2006, no. 2 (66), pp. 50–54. In Rus.
23. Kharina G.V., Aleshina L.V. Accumulation of heavy metals in soils of the Sverdlovsk region. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*, 2022, vol. 333, no. 2, pp. 173–183. In Rus.
24. Shabanov M.V., Marichev M.S. Geochemical anomalies of heavy metals in soils of natural and anthropogenic landscapes (on the example of the Krasnoyarsk industrial hub). *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*, 2022, vol. 333, no. 6, pp. 230–239. In Rus.
25. Saha D., Chatterjee D., Chakravarty S. Investigation of environmental-concern trace elements in coal and their combustion residues from thermal power plants in Eastern India. *Natural Resources Research*, 2019, vol. 28, no. 4, pp. 1505–1520. DOI: ORG/10.1007/S11053-019-09451-2
26. Ramazanov E., Seung Hwan Lee, Woojin Lee. Stochastic risk assessment of urban soils contaminated by heavy metals in Kazakhstan. *Science of the Total Environment*, 2021, vol. 750. DOI: ORG/10.1016/J.SCITOTENV.2020.141535.
27. Nogovitsyn D.D., Nikolaeva N.A., Sheina Z.M. Comprehensive assessment of the impact of the Kangalassky coal mine on the state of the natural environment. *Science and Education*, 2006, no. 2, pp. 73–78. In Rus.
28. Chabukdhara M., Singh O.P. Coal mining in northeast India: an overview of environmental issues and treatment approaches. *International Journal of Coal Science & Technology*, 2016, no. 3 (2), pp. 87–96. DOI: org/10.1007/s40789-016-0126-1
29. Chugh Y.P., Behum P.T. Coal waste management practices in the USA: an overview. *International Journal of Coal Science & Technology*, 2014, no. 1(2), pp. 163 – 176. DOI: org/10.1007/s40789-014-0023-4
30. Gryaznov O.N., Elokhina S.N. Geoecological criteria for assessing ash dumps at thermal power plants within the Ural region. *Izvestiya Vuzov. Mining magazine*, 2005, no. 6, pp. 32–39. In Rus.
31. Musikhina E.A., Golovneva T.I. The task of a comprehensive assessment of anthropogenic soil pollution in the territory of the Irkutsk region. *Ecological risks and economic damages*, 2008, no. 3, pp. 73–76. In Rus.
32. Kireeva A.S. The current state and environmental assessment of the impact of rock dumps of coal industry enterprises. *News of the Tula state university. Sciences of Earth*, 2022, vol. 1, pp. 62–71. In Rus.
33. Korotchenko I.S., Pervyshina G.G., Muchkina E.Ya. Influence of the process of burning coals from the Irsha-Borodinsky open pit mine on the deposition of heavy metals in the soil (on the example of the Minusinsk CHPP). *Ugol*, 2020, no. 6, pp. 67–69. In Rus.
34. Legostaeva Ya.B., Gololobova A.G. Features of distribution of microelements in soils of background and impact zones at diamond mining sites in the North-West of the Siberian Platform. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*, 2021, vol. 332, no. 9, pp. 142–153. In Rus.
35. Lukyanova N.V., Myaskov A.V. Impact of the mining industry on specially protected natural areas. *Mining Informational and analytical bulletin*, 2007, no. 6, pp. 323–330. In Rus.
36. Mikhailenko V.N. Investigation of the nature of contamination of the territory of Transbaikalia by technogenic waste from mining. *Mining Informational and analytical bulletin*, 2008, no. 3, pp. 151–154. In Rus.
37. Kornilkov S.V., Rybnikova L.S., Rybnikov P.A., Smirnov A.Yu. Geoinformation monitoring for solving environmental problems in the mining areas of the Middle Urals. *Russian mining industry*, 2022, no. 1S, pp. 127–133. In Rus.
38. Elokhina S.N., Kindler A.A. Monitoring the state of the subsoil during the mining post-operation period in the Urals (Degtyarsky site). *News of the Ural State Mining University*, 2020, vol. 1 (57), pp. 105–117. In Rus. DOI: 10.21440/2307-2091-2020-1-105-117.
39. Evtushkova E.P. Ecological state of agricultural land in the south of the Tyumen region. *Agro-food policy of Russia*, 2016, no. 12 (60), pp. 51–53. In Rus.
40. Buzuk G.N. Ecological scales L.G. Ramensky: new opportunities. *Bulletin of the Bryansk branch of the RBO*, 2018, no. 1 (13), pp. 37–43. In Rus.
41. Gridin V.G., Chamkina T.I. Indicators of sustainable development and assessment with their help of the state of the environment of

- Kuzbass. *Mining Informational and analytical bulletin*, 2007, no. 12, pp. 180–191. In Rus.
42. Kupriyanov A.N., Manakov Yu.A. Integral indicator of the state of disturbed lands after coal mining. *The Bulletin of KrasGau*, 2010, no. 3, pp. 29–35. In Rus.
 43. Kalabin G.V. Ecological sustainability indicators of the mining industry areas in Russia. *Journal of Mining Science*, 2020, vol. 56, no. 3, pp. 175–183.
 44. Gamm T.A., Kaliev A.Zh. Differentiation of the territory according to environmental indicators of technogenic load. *Vestnik Orenburg State University*, 2004, no. 9, pp. 98–101. In Rus.
 45. Hsai-Yang Fang, Chaney R.C. Introduction to environmental geotechnology. *Taylor and Francis Group*, 2016, pp. 726. DOI: ORG/10.1201/9781315374734
 46. Zenkov I.V., Yuronen Yu.P., Karacheva G.A., Stukova O.O., Vokin V.N., Kiryushina E.V., Mironova Zh.V., Veretenova T.A. Using the results of remote sensing in the assessment of ecosystem restoration in areas with open-pit coal mining in the regions of the Urals. *Ugol*, 2020, no. 10, pp. 68–71. In Rus.
 47. Makarov D.V., Konina O.T., Goryachev A.A. Dusting suppression at tailings storage facilities. *Journal of Mining Science*, 2021, vol. 57, no. 4, pp. 160–170.
 48. Ponomarenko M.R., Kutepov Yu.I., Shabarov A.N. Information and analytical support for monitoring the state of open-pit mining facilities based on web mapping technologies. *Mining Informational and analytical bulletin*, 2022, no. 8, pp. 56–70. In Rus.
 49. Shipilova A.M., Semina I.S. Evaluation of the soil-ecological state of technogenic landscapes of Kuzbass depending on the technology of reclamation of disturbed lands. *News of the Ural State Mining University*, 2017, no. 3, pp. 53–56. In Rus.
 50. Senchenko D.S., The main criteria for assessing lands disturbed by mining for educational and recreational reclamation. *Mining Informational and analytical bulletin*, 2008, no. 11, pp. 153–159. In Rus.
 51. Mel'nikov N.N., Mesyats S.P., Volkova E. Yu. Methodological approach to restoration of ecosystem functions in the industrially generated lands. *Journal of Mining Science*, 2014, vol. 50, pp. 190–198.
 52. Hao Bing-yuan, Kang Li-Xun. Mine land reclamation and eco-reconstruction in Shanxi Province I: mine land reclamation model. *The Scientific World Journal*, 2014, vol. 1, pp. 1–9. DOI: 10.1155/2014/483862.
 53. Loures L., Panagopoulos T. Sustainable reclamation of industrial areas in urban landscapes. *Transactions on Ecology and the Environment*, 2007, vol. 102, pp. 791–800. DOI: 10.2495/SDP070752.
 54. Bascetin A. A decision support system using analytical hierarchy process (AHP) for the optimal environmental reclamation of an open-pit mine. *Environ Geol*, 2007, vol. 52, pp. 663–672. DOI: org/10.1007/s00254-006-0495-7.
 55. Dara A., Baumann M., Kuemmerle T., Pflugmacher D., Rabe A., Hölzel N., Kamp J., Freitag M., Hostert P. Mapping the timing of cropland abandonment and recultivation in northern Kazakhstan using annual Landsat time series. *Remote sensing of environment*, 2018, vol. 213, pp. 49–60. DOI: org/10.1016/j.rse.2018.05.005.
 56. Toktar M., Lo Papa G., Kozybayeva F.E., Dazzi C. Ecological restoration uncontaminated soils of Kokdzhon phosphate mining area (Zhambyl region, Kazakhstan). *Ecological Engineering*, 2016, vol. 86, pp. 1–4. DOI: org/10.1016/j.ecoleng.2015.09.080.
 57. Alavi I., Ebrahimabadi A., Hamidian H. Choosing the most proper plant types in reclamation of an open-pit mine. *Journal of Mining Science*, 2022, vol. 58, no. 1, pp. 170–181.
 58. Nemova N.A., Reznik A.V., Karpov V.N. Modeling the process of land restoration as part of the digitalization of deposits. *Interexpo Geo-Siberia*, 2021, vol. 2, no. 3, pp. 322–331. In Rus.
 59. Trofimez L.N., Panidi E.A., Kikin P.M. Integration of data of the remote sensing, GIS, and gamma-spectrometric analysis to study soil material redistribution. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2021, vol. 43, pp. 147–152.

Received: 28 April 2023.

Reviewed: 18 May 2023.

Information about the authors

Vladimir L. Gavrilov, Cand. Sc., leading researcher, Chinakal Institute of Mining SB RAS.

Natalya A. Nemova, Cand. Sc., senior researcher, Chinakal Institute of Mining SB RAS; associate professor, Siberian State University of Geosystems and Technologies.

Alexander V. Reznik, Cand. Sc., senior researcher, Chinakal Institute of Mining SB RAS.

Nikolay S. Kosarev, Cand. Sc., associate professor, Siberian State University of Geosystems and Technologies; senior researcher, Chinakal Institute of Mining SB RAS.

Aleksey A. Kolesnikov, Cand. Sc., associate professor, Siberian State University of Geosystems and Technologies; senior researcher, Chinakal Institute of Mining SB RAS.

УДК 550.46:544.77

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА ДИНАМИЧЕСКОГО РАССЕЯНИЯ СВЕТА ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАЗДЕЛЕНИЯ ВЗВЕШЕННЫХ И КОЛЛОИДНЫХ ЧАСТИЦ РЕЧНЫХ ВОД ФИЛЬТРАЦИЕЙ И ЦЕНТРИФУГИРОВАНИЕМ

Шулькин Владимир Маркович,
shulkin@tigdvo.ru

Тихоокеанский институт географии ДВО РАН,
Россия, 690041, г. Владивосток, ул. Радио, 7.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью контроля полноты разделения взвешенных и коллоидных частиц при использовании методов фильтрации и центрифугирования в ходе анализа химического состава речных вод.

Цель: проверить и оценить возможность использования метода динамического рассеяния света для контроля эффективности сепарации взвешенных и коллоидных частиц речных вод фильтрацией и центрифугированием.

Объекты: воды рек юга Дальнего Востока РФ с различным уровнем антропогенной нагрузки и ландшафтной структурой водосборов, что ведет к заметным вариациям содержания взвеси и концентрации растворенных, коллоидных и взвешенных форм химических элементов в речных водах.

Методы: измерение интенсивности (I) динамического рассеяния света, расчет интенсивности на частицах с определенным размером при помощи прибора Photocor COMPACT Z в нефiltroванных пробах речных вод, а также в фильтрах через капсульные и мембранные фильтры с различной степенью коагулирования и в центрифугатах, полученных при различных режимах. Одновременно определяли содержание суммы взвешенных и крупно-коллоидных частиц в исходных пробах речных вод гравиметрически после фильтрации через мембранные фильтры с размером пор 0,45 мкм.

Результаты. Величина интенсивности динамического рассеяния света в нефiltroванных речных водах демонстрирует значимую линейную зависимость от содержания взвеси в интервале 5–150 мг/л, определенной гравиметрически. В фильтрах через мембранный или капсульный фильтр 0,45 мкм интенсивность динамического рассеяния света не зависит от содержания взвеси в исходных пробах. Анализ распределения интенсивности динамического рассеяния света в зависимости от размера частиц её вызывающих в нефiltroванных пробах и в фильтрах подтверждает относительно близкую эффективность удаления частиц крупнее 0,45 мкм как при фильтрации через мембранный или капсульный фильтры, так и при центрифугировании в течение 30` при 4500 об/мин. Метод динамического рассеяния света позволяет охарактеризовать эффективность сепарации взвешенных и крупно-коллоидных частиц в речных водах от тонких коллоидов и растворенных форм при использовании мембранных и капсульных фильтров, а также центрифугирования. Таким образом, появляется возможность контролировать процессы коагулирования фильтров и выбирать оптимальные методы для разделения взвешенных и коллоидных частиц при химическом анализе речных вод.

Ключевые слова:

Динамическое рассеяние света, речные воды, взвешенные и коллоидные частицы, распределение по размерам, фильтрация, центрифугирование.

Введение

Значительная часть химических элементов в речных водах мигрирует в составе взвешенных и коллоидных частиц [1]. Поэтому информация о содержании взвеси, её гранулометрическом составе и размере распределении коллоидных частиц/агрегатов является важной характеристикой миграции вещества с речным стоком [2]. Размер частиц во многом предопределяет поведение химических соединений в водном потоке, а также их участие в сорбционных процессах, химический состав и биодоступность [3]. Отделение взвешенных частиц от коллоидных и растворенных проводят фильтрацией через фильтры с размером пор 0,45/0,22 мкм или центрифугированием. Общее содержание взвешенных частиц в речных водах наиболее часто определяют гравиметрически по изменению веса фильтров до и после фильтрации 0,5–2 л исследуемых вод [4], особенно если требуется последующий анализ этого материала. Центрифугирование применяют при необходимости накопления достаточно большой массы взвеси [5, 6]. Отделение взвешенных форм фильтрацией 0,45 мкм неизбежно сопровождается артефактами, прежде всего коагулирова-

нием (закупоркой) пор, в результате чего часть коллоидов размером существенно меньше 0,45 мкм задерживается фильтром, что ведет к неконтролируемому занижению концентрации ряда химических элементов в фильтрате [7, 8]. Количественная характеристика степени прохождения коллоидных частиц через коагулированный фильтр позволила бы оценить и контролировать процесс, однако на практике коагулирование и его влияние на результаты анализа вод игнорируются [7]. При центрифугировании коагуляции места нет, однако для корректного расчета условий осаждения частиц определенного размера необходима информация об их реальной плотности [9], которая обычно отсутствует. Расчеты интенсивности центрифугирования, основанные на законе Стокса, свидетельствуют о том, что частицы размером более 0,4 мкм должны достаточно эффективно удаляться из раствора [10]. Однако есть данные, что даже после 5 ч центрифугирования при 4000 об/мин просвечивающая электронная микроскопия показала наличие частиц 0,4 мкм в центрифугате, что объяснялось наличием органоминеральных агрегатов малой плотности [3]. Таким образом, очевидно, что и при

центрифугировании необходима оценка количества коллоидных частиц, остающихся в центрифугате.

Кроме гравиметрического определения содержания взвешенного материала, разработан ряд методов, основанных на изменении оптических и электрических свойств воды в зависимости от содержания взвеси. Среди этих методов можно выделить разнообразные датчики, измеряющие рассеяние света *in-situ*, а также ряд методов, используемых для анализа воды в лабораторных условиях. При изучении распределения взвешенных и коллоидных частиц по различным размерным фракциям доминируют оптические методы, основанные на исследовании рассеяния монохромных и лазерных источников света [11, 12] вследствие высокой чувствительности и возможности проведения анализа в малом объеме пробы или *in-situ*. В то же время оптические методы изучения взвешенных и коллоидных частиц не позволяют определить их химический состав и морфологию, и наибольший эффект может дать их сочетание с электронной микроскопией и рентгеноспектральными методами [3, 11, 13].

Одним из наиболее разработанных оптических методов для изучения размерного распределения коллоидных частиц является метод динамического рассеяния света (ДРС) (другое название – фотонная корреляционная спектроскопия (ФКС)). Метод ДРС основан на измерении и анализе временных флуктуаций интенсивности рассеяния падающего лазерного излучения в объеме, содержащем коллоидные частицы. Суть метода заключается в измерении малых частотных сдвигов рассеянного излучения, вызванных броуновским движением частиц в жидких средах. Метод ДРС обладает высокой чувствительностью и производительностью, не вносит возмущений в исследуемый объект, процедура анализа проста, и объем требуемой пробы не превышает 2–3 мл [14, 15]. Наиболее широко ДРС применяется для изучения монодисперсных коллоидных систем при изготовлении наночастиц и исследовании их свойств в биологии, фармацевтике и производстве полимеров [11, 13, 16]. Поскольку рассеяние света пропорционально шестой степени размера частиц, очевидно, что главным ограничением применения метода ДРС к речным водам является высокая природная полидисперсность взвеси и коллоидов в реках [3]. Соответственно, ДРС может дать только приблизительную оценку распределения по размерам всего спектра коллоидных и взвешенных частиц [17], поскольку более крупные частицы будут давать непропорционально сильный сигнал и подавлять сигнал от мелких коллоидов. Еще одной особенностью является зависимость сигнала ДРС от формы частиц или агрегатов: при несферической форме результаты расчета гидродинамического диаметра будут существенно ниже реального размера [13]. Все эти ограничения объясняют, почему метод ДРС не очень часто применяют для характеристики размерного спектра частиц в природных, в частности речных, водах [3]. Однако простота и скорость измерения (10–15 проб/час), малый объем пробы, необходимой для анализа (0,5–2 мл), и широкий размерный диапазон регистрируемых частиц (0,001–10 мкм) поз-

воляют предположить, что ДРС все же может быть полезным для характеристики общего содержания и распределения по размерам частиц речной взвеси и коллоидов. Кроме того, ДРС может оказаться подходящим методом для контроля влияния фильтрации и центрифугирования на содержание и распределение по размерам взвешенных и коллоидных частиц в процессе сепарации.

Целью данной работы является проверка возможности использования ДРС для оценки эффективности разделения взвешенных и коллоидных частиц фильтрацией и центрифугированием, а также для характеристики общего содержания и гранулометрического состава речной взвеси на примере рек юга ДВ РФ, дренирующих водосборы различной величины и с различным уровнем хозяйственного освоения.

Материалы и методы

Эксперименты проводились на пробах речной воды, отобранных в нижнем течении рек юга Приморского края РФ: Туманная, Раздольная, Уссури и Амур (рис. 1, а). Бассейны всех рек расположены в умеренной зоне, однако ландшафтные условия водосборов сильно различаются. Реки Туманная и Раздольная с площадью водосборов 33,2 и 16,8 тыс. км², соответственно, дренируют ландшафты с высокой степенью хозяйственного освоения, что отражается в повышенном содержании взвеси и биогенных веществ [18–20]. Реки бассейна Уссури (Уссури, Большая Уссурка и Бикин) имеют площади водосборов 21,4–29,5 тыс. км² с преобладанием таежных лесных ландшафтов, низким уровнем антропогенной нагрузки, но с широким развитием обширных заболоченных пойм в нижнем течении. Особенности состава вод рек бассейна Уссури является невысокое содержание взвеси, не превышающее 30–40 мг/л даже в летние паводки, и повышенная концентрация растворенных форм углерода (РОУ) и железа [19, 20]. Крупнейшая река региона Амур имеет бассейн площадью более 1800 тыс. км² со всем спектром ландшафтов на водосборе от степей с высоким уровнем аграрного освоения на юге до тайги со спорадической многолетней мерзлотой на севере. Особенностью среднего течения р. Амур вблизи г. Хабаровска, где проводилось опробование, является наличие трех четко обособленных струй в период отбора проб: собственно Амура, сформированного стоком рек Зеи и Буреи, под левым берегом (А4), струю р. Сунгари в центре потока, которая впадает в Амур в 200 км выше по течению от г. Хабаровска (А5), и струю р. Уссури под правым берегом (А6) [21].

Речные воды отбирались с берега или с резиновой лодки в двухлитровые полиэтиленовые емкости, закрепленные на четырехметровом пластиковом шесте. Емкости предварительно отмывались 1Н HCl, деионизованной водой (18 МОм) и несколько раз ополаскивались отбираемой водой. Электропроводность, температуру, pH измеряли во время отбора. Краткая характеристика проб и водного режима рек в период опробования приведена в таблице. Все исходные нефилтрованные пробы хранились в холодильнике и гомогенизировались встряхиванием емкостей перед анализом методом ДРС.

Таблица. Характеристика проб речной воды исследованных методом ДРС

Table. Characteristics of the river waters studied by dynamic light scattering (DLS) method

Река River	№ пробы Sample no.	Дата отбора Sampling date	Водный режим Water condition	Взвесь Suspended solids	POY DOC	EC, мкС/см EC, uS/cm
				мг/л/mg/L		
Туманная/Tumannaya	T66	25.07.19	паводок/flood	341±15	4,3±0,1	116±3
Раздольная/Razdolnaya	R216	10.09.20	паводок/flood	449±15	10,6±0,2	63±2
	R221	03.08.22	высокая вода/high water	89±5	7,9±0,2	92±3
	R223	08.09.22	паводок/flood	126±6	8,8±0,2	99±3
	R224	27.10.22	межень/low water	32±2	5,7±0,1	114±3
	R225	28.11.22		29±2	4,9±0,1	121±3
	R226	20.12.22	ледостав/ice cover	14±1	5,0±0,1	160±3
Амур/Amur	A4	21.08.21	высокая вода/high water	69±3	9,3±0,2	56±2
	A5	21.08.21		108±5	8,5±0,2	96±3
	A6	21.08.21		15±1	8,4±0,2	46±2
Уссури/Ussuri	U9	19.09.22	спад паводка/flood decline	24±2	10,8±0,2	38±2
	U10	19.09.22		28±2	7,8±0,2	45±2

EC – электропроводность, POY – растворенный органический углерод.

EC – electro conductivity, DOC – dissolved organic carbon.

Пробы р. Раздольная R224, R225, R226 были изучены методом ДРС наиболее детально по следующей схеме. Пробы разделяли на несколько аликвот при интенсивном перемешивании. Первую аликвоту (0,3–0,5 л) фильтровали через капсульный фильтр Pall GWV 0,45 мкм мало подверженный коагулированию из-за большой площади фильтрации (700 см²). Ещё 0,5–1 л фильтровали через предварительно взвешенные мембранные фильтры Millipore Durapore с размером пор 0,45 мкм, диаметром 47 мм и площадью фильтрации 13 см². Фильтрация через мембранные фильтры проводилась последовательно 100 мл порциями через один и тот же фильтр для оценки динамики коагулирования мембраны. После высушивания в течение 6 ч. при 85 °С мембранные фильтры со взвесью взвешивали с точностью 0,1 мг для определения её содержания в речной воде. Ещё несколько аликвот центрифугировали в 50 мл полипропиленовых пробирках на центрифугах Elmi и Heraeus Multifuge при 7 различных режимах: 5'/1500; 12'/1500; 6'/3000; 10'/3000; 15'/3000; 20'/3500; 30'/4500 об/мин.

Режимы центрифугирования выбирали исходя из известной формулы (1), связывающей время и скорость центрифугирования с размером и плотностью осаждаемых частиц, с учетом геометрии центрифуг [22]:

$$t=18\eta\ln(R_1/R_2)/\omega^2\cdot D^2\cdot(d_p-d_w), \quad (1)$$

где t – время центрифугирования частиц (агрегатов) диаметром D (см) и плотностью d_p (г/см³) в воде с плотностью $d_w=1,0$ г/см³ и динамической вязкостью $\eta=0,01$ г/(см·сек), угловой скоростью вращения ω (рад/сек) и расстоянием от оси вращения до уровня осадения R_1 и до уровня поверхности суспензии R_2 .

Принимая, что при наиболее интенсивном из применявшихся 30-минутном центрифугировании со скоростью 4500 об/мин осаждаются взвешенные частицы и агрегаты крупнее 0,45 мкм, расчёт плотности осаждаемых частиц по формуле (1) дает оценку $d_{0,45}=1,184$ г/см³. Это значительно меньше плотности алюмосиликатных алевритовых/пелитовых частиц почв, составляющей 2,42 г/см³ [10], а также органоминеральных флоккул, образующихся при взмучива-

нии донных отложений 1,65 г/см³ [9], и свидетельствует о «рыхлости» по крайней мере части органоминеральных агрегатов коллоидного размера, мигрирующих в изученных речных водах и, вероятно, о присутствии органического вещества в составе речной взвеси. Приняв плотность частиц/агрегатов в центрифугируемой воде $d_{0,45}=1,184$ г/см³, можно рассчитать размеры частиц, которые осаждаются при различных использовавшихся режимах центрифугирования. В частности, минимальные размеры сферических частиц/агрегатов, осаждающихся при использованных нами режимах, должны составлять 2,96; 1,9; 1,35; 1,0; 0,85; 0,63 и 0,45 мкм. Общая схема обработки проб для оценки эффективности разделения взвешенных, коллоидных и растворенных частиц в речных водах методом ДРС приведена на рис. 1, б.

Гомогенизированную аликвоту нефильтрованной воды, а также центрифугаты и фильтраты исследовали методом ДРС на приборе PHOTOCOR Compact Z. В качестве источника света в приборе используется термостабилизированный полупроводниковый лазер 638 нм с регулируемой мощностью 10–200 мВт и возможностью уменьшения интенсивности рассеянного света (аттенуатор) и угла его регистрации (90° и 160°), имеется система термостатирования с точностью 0,1 °С и встроенный коррелятор Photocor FC с минимальным временем выборки 10 нс. Объем пробы 1,5–3 мл. Обработка результатов проводилась в программе DynaLS.

Съемку проводили в кюветах из оптического полиметилметакрилата. Исходные гомогенизированные пробы, а также фильтраты и центрифугаты снимались в 2–3 повторностях. Кроме того, исходные пробы несколько раз переснимались с интервалом от 1–3 дней до 2–3 месяцев для характеристики возможного дрейфа прибора и процессов коагуляции в пробах при хранении при 4 °С. Изменения в интенсивности ДРС при хранении и параллельных измерениях не превышали 5 % от первоначального значения. Использовалась мощность лазера 15 мВт с аттенуатором 1 и/или 3,8, время накопления сигнала 3 мин. Интенсивность рассеянного света в исходных пробах старались под-

держивать на уровне 50000–1000000 имп/с (cps – counting per second) в соответствии с рекомендациями производителя, исходя из технических параметров прибора PHOTOCOR Compact Z.



Рис. 1. Схема района работ (а) с расположением точек отбора речных вод (1) и схема обработки нефильтрованных проб речной воды (б) с использованием различных способов фильтрации и режимов центрифугирования: мб – фильтрация через мембрану 0,45 мкм, цф – центрифугирование с расчетным минимальным диаметром осаждаемых частиц, μm (мкм)

Fig. 1. Study area (a) with sampling points (1) and diagram of the unfiltered water processing (b) with different filtration scheme, and centrifugation: мб – filtration through membranes 0,45 μm, цф – centrifugation at different regimes with calculated minimal diameter of sedimented particles, μm

Теоретические основы и математический аппарат метода ДРС изложены во многих источниках, например, в монографии Шмитца [16]. Метод основан на том, что броуновское движение в пробе воды сопровождается флуктуациям локальной концентрации коллоидных частиц. Результатом этого являются вариации показателя преломления и, соответственно, флуктуации интенсивности рассеянного света при прохождении лазерного луча через пробу. Метод ДРС позволяет определить коэффициент диффузии дис-

персных частиц в жидкости путем анализа корреляционной функции этих флуктуаций. Далее из коэффициента диффузии рассчитывается «гидродинамический» радиус частиц. При этом математически строгое определение размера частиц по флуктуациям рассеяния и корреляционной функции возможно только для монодисперсных коллоидных частиц близкого размера. Для полидисперсных образцов интерпретация экспериментальных данных усложняется. Кроме того, ДРС имеет достаточно слабое разрешение, т. е. размеры частиц должны различаться как минимум в 2–3 раза, чтобы дать отдельные пики [23].

Результаты и обсуждение

Анализ исходных неразделенных проб речных вод методом ДРС показал наличие значимой корреляционной связи в достаточно широком диапазоне между интенсивностью рассеяния и содержанием взвеси в пробе, определенной гравиметрически (рис. 2). При этом, если рассматривать данные для речных вод с содержанием взвеси менее 150 мг/л и интенсивностью рассеяния менее 1500000 имп/сек, т. е. в условиях, когда использование метода ДРС наиболее корректно [17], можно констатировать линейную зависимость между интенсивностью рассеяния и содержанием взвеси (рис. 2). Это позволяет предположить, что интенсивность ДРС в центрифугатах и фильтрах, полученных при различных режимах центрифугирования и фильтрации, также будет пропорциональна общему содержанию коллоидных частиц. Соответственно, данные по интенсивности ДРС в центрифугатах и фильтрах можно было бы использовать как показатель эффективности разделения растворенных, коллоидных и взвешенных частиц.

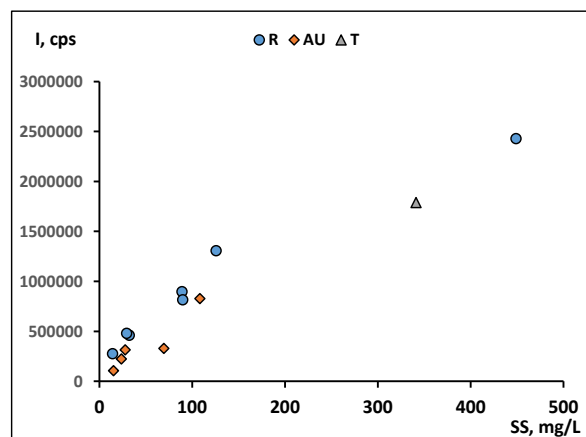


Рис. 2. Зависимость интенсивности рассеяния света (I, имп/сек) от содержания взвеси (SS, мг/л) при исследовании нефильтрованных проб вод р. Раздольная (R), Амур и Уссури (AU), и Туманная (T) методом ДРС

Fig. 2. Intensity of scattered light (I, cps) of the unfiltered waters from Razdolnaya river (R), Amur and Ussury rivers (AU), and Tummannaya river (T) with different content of suspended solids (SS, mg/L)

На рис. 3 приведены результаты измерения интенсивности ДРС в ходе центрифугирования и фильтра-

ции наиболее детально изученных проб р. Раздольная R224, R225, R226, отобранных осенью и зимой 2022–2023 гг. Максимальная интенсивность рассеяния регистрируется в исходных нефитрированных пробах речной воды. При центрифугировании наблюдается закономерное снижение интенсивности ДРС по мере увеличения скорости и времени центрифугирования. Если соотнести параметры центрифугирования с диаметром частиц, которые должны при этом осаждаться, исходя из плотности частиц $1,184 \text{ г/см}^3$, можно констатировать постепенное снижение количества и размера коллоидных частиц в центрифугатах по мере увеличения интенсивности центрифугирования (рис. 3, а). Интенсивность ДРС в центрифугатах, полученных при 30' центрифугировании на скорости 4500 об/мин, уменьшается до уровня близкого к фильтрату, полученному после капсульного фильтра GWV с размером пор 0,45 мкм (рис. 3, б). Это подтверждает справедливость исходной гипотезы о том, что ДРС может быть использовано для оценки эффективности центрифугирования при разделении взвешенных и коллоидных/растворенных частиц,

и что центрифугирование в течение 30' при 4500 об/мин можно достаточно корректно использовать для выделения частиц $<0,45 \text{ мкм}$.

Фильтрат первых 100 мл через мембранный фильтр (0,45_Milli) по интенсивности ДРС также сравним с центрифугатом 30'/4500 и фильтратом через капсульный фильтр GWV (рис. 3, б). Однако фильтрование через ту же мембрану двух следующих 100 мл аликвот (Milli-200, Milli-300) значительно снижает интенсивность ДРС в фильтратах. То есть коагулирование мембранного фильтра даже после 100 мл речной воды уменьшает количество коллоидных частиц в фильтрате в 10–20 раз при содержании взвеси осенью 29–32 мг/л (R224, R225). В начале зимы при содержании взвеси 14 мг/л (R226) количество коллоидов после коагулирования также снижается, но всего в 2 раза (рис. 3, б). Можно предположить, что в ледостав размер коллоидных частиц в речных водах уменьшается, их коагулирующая способность снижается, и, соответственно, большая часть коллоидов попадает в фильтрат.

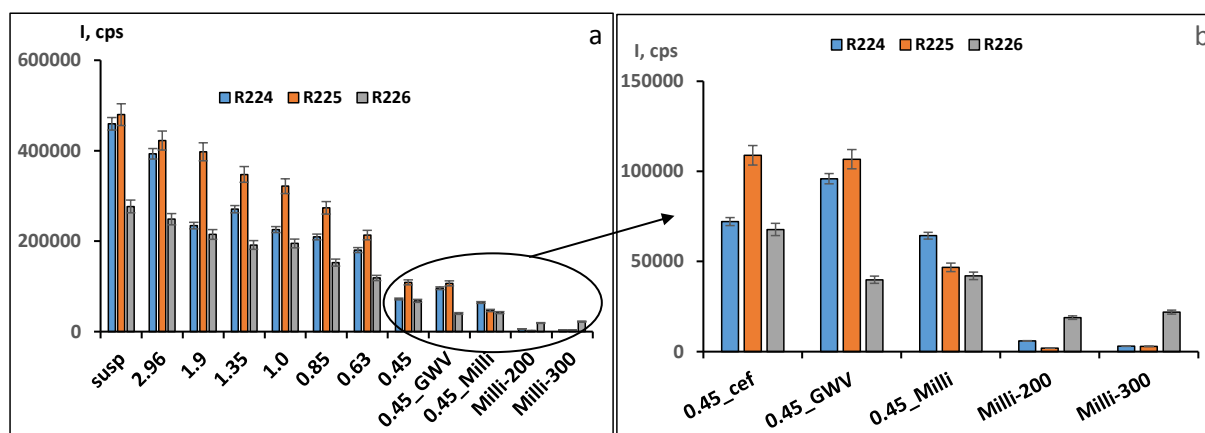


Рис. 3. (а) Изменение интенсивности ДРС (I , имп/сек) в центрифугатах и фильтратах проб R224, R225, R226 вод р. Раздольная, полученных при различных режимах центрифугирования и фильтрации. Susp – нефитрированная вода; 2,96–0,45 – максимальный размер частиц в декантате при центрифугировании; 0,45_GWV – фильтрат после капсульного фильтра; 0,45_Milli – фильтрат 100 мл после мембранного фильтра 0,45 мкм; Milli-200 – фильтрат вторых 100 мл через тот же мембранный фильтр 0,45 мкм; Milli-300 – фильтрат третьих 100 мл через тот же мембранный фильтр 0,45 мкм; (б) Изменение интенсивности ДРС фильтратов и центрифугата 30'/4500 в укрупненном масштабе

Fig. 3. (a) Comparison of DLS intensity (I , cps) in the unfiltered waters, filtrates and supernatants obtained at different regimes for the samples R224, R225, R226. Susp – unfiltered water; 2,96–0,45 – upper limit of particles size in supernatants after centrifugation; 0,45_GWV – filtrate after capsule filter; 0,45_Milli – filtrate of 100 ml after membrane 0,45 μm ; Milli-200 – filtrate of second 100 ml after the same membrane; Milli-300 – filtrate of third 100 ml after the same membrane; (b) upscaled DLS results for the filtrates and centrifugates 30'/4500

Рассматривая зависимость интенсивности динамического рассеяния света не только нефитрированных вод (рис. 2), но также фильтратов и центрифугатов от исходного содержания взвеси (рис. 4), можно отметить, что для фильтратов и центрифугатов, содержащих коллоиды менее 0,45 мкм, зависимость от исходного содержания взвеси практически отсутствует. Это подтверждает эффективность применявшихся методов сепарации, а также то, что содержание относительно мелких коллоидных частиц $<0,45 \text{ мкм}$ в изученных водах р. Раздольной мало зависит от количества взвеси. В то же время для центрифугатов (1cf), полученных

после 10' при 3000 об/мин, т. е. при осаждении частиц $>1 \text{ мкм}$, наблюдается значимая тенденция увеличения интенсивности рассеяния при возрастании общего содержания взвеси (рис. 4). Это говорит о том, что в отличие от коллоидов $<0,45 \text{ мкм}$, количество крупных коллоидных частиц размером 0,45–1 мкм в водах р. Раздольной прямо зависит от содержания взвеси, т. е. от водного режима. Максимальное количество крупных коллоидов (0,45–1 мкм) будет наблюдаться в период паводков и половодья, хотя необходимы дополнительные работы на других реках для оценки универсальности этого предположения.

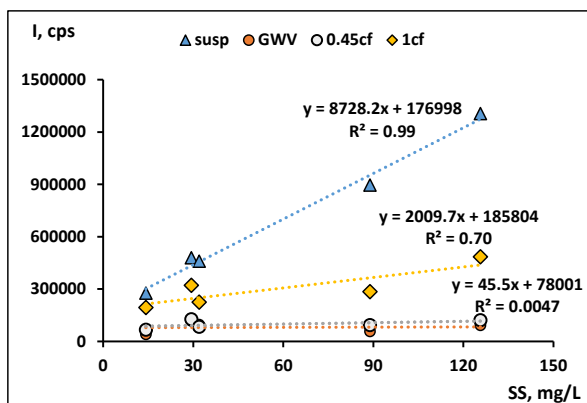


Рис. 4. Зависимость интенсивности рассеяния света (I , имп/с) от содержания взвеси (SS , мг/л) для нефльтрованных проб р. Раздольной (*susp*), фильтратов через капсульный фильтр 0,45 мкм (*GWV*), центрифугатов 30' / 4500 об/мин (*0,45cf*) и центрифугатов 10' / 3000 об/мин (*1cf*)

Fig. 4. Dependence of the intensity of scattered light (I , cps) on the suspended solids content (SS , mg/L) for the unfiltered waters of Razdolnaya river (*susp*), filtrates after 0,45 μm capsule (*GWV*), supernatants 30' / 4500 (*0,45 cf*) and supernatants 10' / 3000 (*1 cf*)

Кроме общей оценки интенсивности рассеяния, метод ДРС позволяет оценить, какие именно размерные фракции взвешенных и коллоидных частиц отвечают за рассеяние падающего лазерного излучения. Полидисперсность состава взвеси и коллоидов речных вод позволяет рассматривать данные об

их гранулометрическом составе, полученные методом ДРС, только как ориентировочные [3]. Тем не менее из распределения величины интенсивности рассеяния ДРС нефльтрованной пробы R224, отобранной в р. Раздольной осенью при содержании взвеси 32 мг/л, очевидно доминирование в этой пробе частиц/агрегатов двух размерных фракций: с медианным диаметром 0,19 мкм, обуславливающих 22 % интенсивности рассеяния, и диаметром 38 мкм, отвечающих за 78 % всей интенсивности рассеяния (рис. 5, а).

Фильтрация через капсульный фильтр *GWV* 0,45 мкм привела к тому, что 98 % интенсивности рассеяния происходит за счет частиц с диаметром 0,16 мкм (рис. 5, б), что свидетельствует о высокой эффективности сепарации крупных частиц. Судя по спектру интенсивности рассеяния, эффективность сепарации при центрифугировании также высока (рис. 5, в). Фильтрация 100 мл через мембранный фильтр 0,45 мкм сопровождается увеличением доли частиц диаметром 0,14 мкм до 46 %, однако в фильтрате остается заметная доля (21 %) крупных частиц размером более 20 мкм (рис. 5, г). Появление в спектре рассеяния после фильтрации пиков от частиц размером менее 0,001 мкм (<1 нм) (рис. 5, б, г) обусловлено либо вымыванием коллоидных частиц из материала фильтров, либо это артефакт расчета программой DynaLS, поскольку 1 нм является нижней границей оценки размера частиц методом ДРС [3, 17].

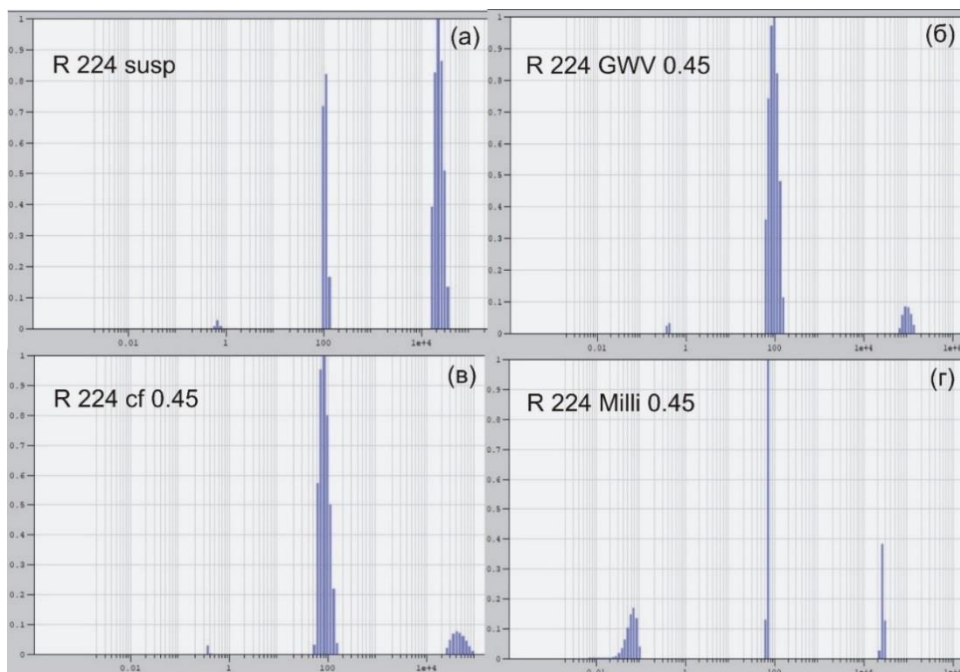


Рис. 5. Распределение интенсивности рассеяния на частицах различных размеров для нефльтрованной пробы R 224 *susp* (а) и той же пробы, профильтрованной через капсульный фильтр 0,45 мкм (б), центрифугированной 30' при 4500 об/мин (в), и профильтрованной через мембранный фильтр Millipore, диаметром 47 мм и размером пор 0,45 мкм (г); ось абсцисс – радиус частиц, нм; ось ординат – нормированная интенсивность (скриншоты DynaLS)

Fig. 5. Intensity size distribution of unfiltered Razdolnaya river sample R 224 *susp* (а), filtered through *GWV* 0,45 μm capsule (б), centrifugate 30' at 4500 min^{-1} (в), and filtrated trough Millipore membrane 47 mm, 0,45 μm pore size (г); abscissa – particle radius, nm, ordinate – normalized intensity (screen shots from the DynaLS)

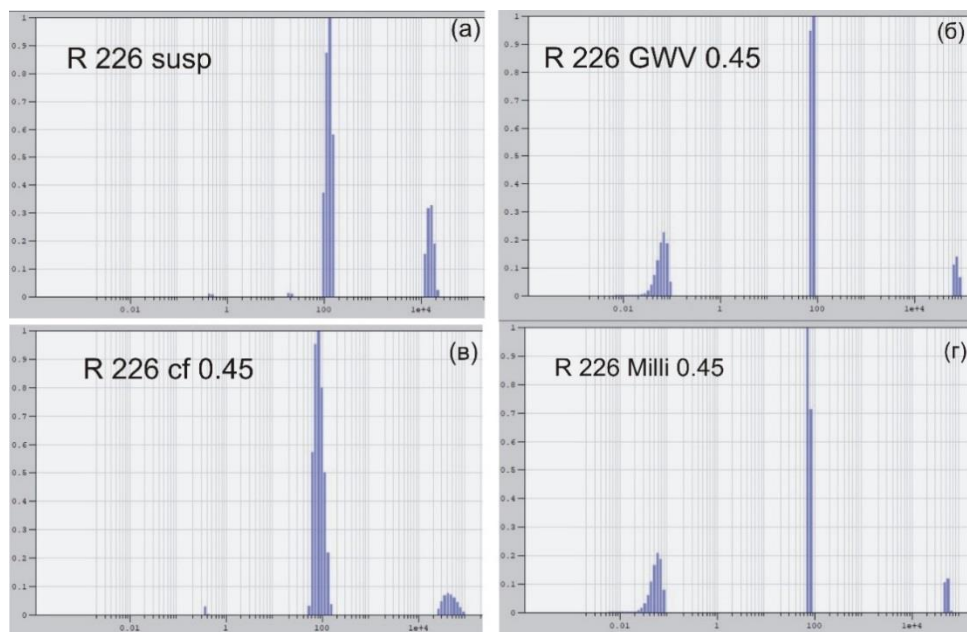


Рис. 6. Аналогично рис. 5, но для пробы R 226

Fig. 6. The same as Fig. 5, but for the river water sample R 226

Близкий характер распределения интенсивности рассеяния в зависимости от размера частиц при фильтрации и центрифугировании демонстрирует проба R 225, также отобранная в осеннюю межень и имевшая сходное содержание взвеси – 29 мг/л (на рисунках не показана).

Проба R 226, содержащая 14 мг/л взвешенного вещества, отобранная в декабре 2022 г. в период ледостава, показала другое распределение интенсивности рассеяния на частицах различных размеров. В нефльтрованной пробе R 226 доминируют коллоидные частицы 0,26 мкм (74 % от всей интенсивности), а крупные частицы размером 32 мкм отвечают лишь за 26 % интенсивности рассеяния (рис. 6, а). После фильтрации через капсульный фильтр доминирование мелких частиц 0,16 мкм сохранилось, а роль крупных частиц в интенсивности рассеяния снижается до 10 %. Однако при этом заметную роль (25 %) в рассеянии стали играть тонкие коллоиды с расчетным диаметром 0,0002 мкм (0,2 нм) (рис. 6, б). Схожий характер распределения интенсивности рассеяния показывает фильтрат R 226, полученный при фильтрации через мембранный фильтр (рис. 6, в). Центрифугат R 226 демонстрирует аналогичное фильтратам снижение роли крупных частиц в интенсивности рассеяния, однако сигналы от тонких коллоидов отсутствуют (рис. 6, в), как и в центрифугате R 224 (рис. 5, в). Это позволяет предположить, что появление рассеяния от тонких коллоидов в фильтрах – это все же последствие вымывания коллоидных частиц из фильтров. То есть это артефакт, но не расчета, а фильтрации.

Заключение

Таким образом, данные по распределению интенсивности рассеяния света в зависимости от размера

частиц свидетельствуют об эффективности удаления частиц крупнее 0,45 мкм как при фильтрации через мембранный или капсульный фильтры, так и при центрифугировании в течение 30' при 4500 об/мин. Однако не исключено, что при фильтрации возможно вымывание тонких коллоидных частиц (<0,2 нм) из фильтрующих материалов в фильтрат, поэтому центрифугирование с точки зрения изучения изменения размерного состава коллоидов является предпочтительным.

Наши данные свидетельствуют о линейной связи общей интенсивности рассеяния света измеренной методом ДРС с содержанием взвешенных и коллоидных частиц в нефльтрованных речных водах в интервале 5–150 мг/л. Откалибровать величины интенсивности ДРС, полученные непосредственно в фильтрах и центрифугатах, в единицах веса не представляется возможным, однако логично предположить, что интенсивность рассеяния в них также будет пропорциональна количеству и размеру коллоидных частиц, и по степени снижения интенсивности ДРС можно судить о количестве коллоидов, прошедших через фильтр или оставшихся в центрифугате. Таким образом, использование метода ДРС позволяет оценить эффективность применения различных методов и условий фильтрации и центрифугирования для сепарации растворенных, коллоидных и взвешенных частиц. Основой такой оценки является зависимость уровня интенсивности рассеяния от общего содержания взвешенного и коллоидного материала в исходной речной воде, а также в фильтрах и в центрифугатах.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ, проект 23-27-00029.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гордеев В.В., Лисицын А.П. Геохимическое взаимодействие пресноводной и морской гидросфер // Геология и геофизика. – 2014. – Т. 55. – № 5–6. – С. 721–744.
2. Савенко В.С. Химический состав взвешенных наносов рек мира. – М.: ГЕОС, 2006. – 175 с.
3. Analytical applications of photon correlation spectroscopy for size distribution measurements of natural colloidal suspensions: capabilities and limitations / M. Filella, J. Zhang, M.E. Newman, J. Buffle // Colloids Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects. – 1997. – V. 120. – P. 27–46.
4. РД 52.24.468-2005. Взвешенные вещества и общее содержание примесей в водах. Методика выполнения измерений массовой концентрации гравиметрическим методом. – Ростов-на-Дону: Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, 2005. – 17 с.
5. Гордеев В.В. Геохимия системы река–море. – М.: ИП Матушкина И.И., 2012. – 452 с.
6. Major and trace elements in suspended matter of western Siberian rivers: first assessment across permafrost zones and landscape parameters of watersheds / I.V. Krickov, A.G. Lim, R.M. Manasypov, S.V. Loiko, S.N. Vorobyev, V.P. Shevchenko, O.M. Dara, V.V. Gordееv, O.S. Pokrovsky // Geochim. et Cosmochim. Acta. – 2020. – V. 269. – P. 429–450.
7. Horowitz A.J. A review of selected inorganic surface water quality-monitoring practices: are we really measuring what we think, and if so, are we doing it right? // Environ. Sci. Technol. – 2013. – V. 47. – P. 2471–2486.
8. Shulkin V., Bogdanova N., Elovskiy E. Influence of clogging at the filtration on analysis of dissolved and particulate forms of chemical elements in boreal rivers of the Russian Far East // Minerals. – 2022. – V. 12. – P. 773–792.
9. Can flocs and water stable soil aggregates be differentiated within fluvial systems? / I.G. Droppo, K. Nackaerts, D.E. Walling, N. Williamset // Catena. – 2005. – V. 60. – P. 1–18.
10. How do colloid separation and sediment storage methods affect water mobilizable colloids and phosphorus? An insight into dam reservoir sediment / D.N. Nguyen, M. Grybos, M. Rabiet, V. Deluchat // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. – 2020. – V. 606. – 125505.
11. Xu R. Light scattering: a review of particle characterization applications // Particuology. – 2015. – V. 18. – P. 11–21.
12. A comparative study of submicron particle sizing platforms: accuracy, precision and resolution analysis of polydisperse particle size distributions / W. Anderson, D. Kozak, V.A. Coleman et al. // Journal of Colloid and Interface Science. – 2013. – V. 405. – P. 322–330.
13. Towards reproducible measurement of nanoparticle size using dynamic light scattering: important controls and considerations / D. Langevina, E. Raspauda, S. Mariota et al. // NanoImpact. – 2018. – V. 10. – P. 161–167.
14. ГОСТ Р 8.774-2011. Дисперсный состав жидких сред. Определение размера частиц по динамическому рассеянию света. – М.: Стандартинформ. 2019. – 36 с.
15. Куликов К.Г., Кошлан Т.В. Определение размеров коллоидных частиц при помощи метода динамического рассеяния света // Журнал технической физики. – 2015. – Т. 85. – Вып. 12. – С. 26–32.
16. Schmitz K.S. An introduction to dynamic light scattering by macromolecules. – Boston: Academic Press, 1990. – 472 p.
17. Bhattacharjee S. DLS and zeta potential – What they are and what they are not // Journal of Controlled Release. – 2016. – V. 235. – P. 337–351.
18. Влияние реки Раздольной на экологическое состояние вод Амурского залива (Японское море) / Т.А. Михайлик, П.Я. Тищенко, А.М. Колтунов, П.П. Тищенко, М.Г. Швецова // Водные ресурсы. – 2011. – № 4. – С. 474–484.
19. Шулькин В.М., Богданова Н.Н., Перпелятников Л.В. Пространственно-временная изменчивость химического состава речных вод юга Дальнего Востока РФ // Водные ресурсы. – 2009. – № 4. – С. 1–12.
20. Шулькин В.М., Богданова Н.Н., Еловский Е.В. Влияние кольматирования фильтров на определение концентрации истинно-растворенных и коллоидных форм миграции химических элементов в речных водах // Водные ресурсы. – 2022. – Т. 49. – № 1. – P. 91–102.
21. Шестеркин В.П., Шестеркина Н.М. Сезонная и пространственная изменчивость содержания аммонийного азота в воде реки Амур у Хабаровска в 2018–2019 годах // Тихоокеанская география. – 2020. – № 3. – С. 56–62.
22. Comparison of centrifugation and filtration techniques for the size fractionation of colloidal material in soil suspensions using sedimentation field-flow fractionation / L.J. Gimbert, P.M. Haygarth, R. Beckett, P.J. Worsfold // Environ. Sci. Technol. – 2005. – V. 39 (6). – P. 1731–1735.
23. Resolving concentrated particle size mixtures using dynamic light scattering / M. Kaszuba, M.T. Connah, F.K. McNeil-Watson, U. Nobbmann // Particle & Particle Systems Characterization. – 2007. – V. 24.3. – P. 159–162.

Поступила: 22.02.2023 г.

Прошла рецензирование: 10.04.2023 г.

Информация об авторах

Шулькин В.М., доктор географических наук, руководитель лаборатории геохимии Тихоокеанского института географии ДВО РАН.

UDK 550.46:544.77

USE OF THE DYNAMIC LIGHT SCATTERING TO ASSESS THE EFFICIENCY OF SEPARATION OF SUSPENDED AND COLLOIDAL PARTICLES IN RIVER WATERS BY FILTRATION AND CENTRIFUGATION

Vladimir M. Shulkin,
shulkin@tigdvo.ru

Pacific Geographical Institute, Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences,
7, Radio street, Vladivostok, 690041, Russia.

The relevance of the study is stipulated by the need to control the completeness and accuracy of separation of suspended and colloidal particles using filtration and centrifugation methods during the analysis of chemical composition of river waters.

The main aim: to test and evaluate the possibility of using the method of dynamic light scattering to monitor the effectiveness of separation of suspended and colloidal particles of river waters by filtration and centrifugation.

Objects: waters of typical rivers of the south of the Russian Far East with different levels of anthropogenic load and landscape structure of watersheds, which leads to obvious variations in the concentration levels of dissolved, colloidal and suspended forms of chemical elements in rivers, as well as to different content and grain size composition of suspended matter.

Methods: measurement of the dynamic light scattering intensity, including its size distribution, using the Photocor COMPACT Z device in unfiltered samples of river waters, as well as in the filtrates through capsule and membrane filters with varying degrees of clogging, and in the supernatants obtained under various conditions. At the same time, the sum content of suspended and coarse-colloidal particles in the initial samples of river waters was determined gravimetrically after filtration through membrane filters with a pore size of 0,45 μm .

Results. The dynamic light scattering intensity in unfiltered river waters demonstrates a significant linear dependence on the suspension content in the range of 5–150 mg/l, determined gravimetrically. In filtrates via a membrane or capsule filter of 0,45 μm , the dynamic light scattering intensity does not depend on suspension content in the unfiltered samples. Analysis of the size distribution of dynamic light scattering intensity in the unfiltered samples, and in the filtrates confirms the removal efficiency of particles larger than 0,45 μm both at the filtration through membrane or capsule filters, and at the centrifugation for 30' at 4500 rpm. The dynamic light scattering allows characterizing the efficiency of separation of suspended and coarse-colloidal particles in river waters from thin colloids and dissolved forms using membrane and capsule filters, as well as centrifugation. Thus, it becomes possible to control the processes of filters clogging and choose the optimal method for separation of suspended and colloidal particles at chemical analysis of river waters.

Key words:

Dynamic light scattering, river waters, suspended and colloidal particles, size distribution, filtration, centrifugation.

The research was supported by the RSF grant, project 23-27-00029.

REFERENCES

- Gordeev V. V., Lisitzin A.P. Geochemical interaction between the freshwater and marine hydrospheres. *Geology and geophysics*, 2014, vol. 55, no. 5–6, pp. 721–744. In Rus.
- Savenko V.S. *Khimichesky sostav vzveshennykh nanosov rek mira* [Chemical composition of the river suspended solids]. Moscow, GEOS Publ., 2006. 175 p.
- Filella M., J. Zhang, Newman M.E., Buffle J. Analytical applications of photon correlation spectroscopy for size distribution measurements of natural colloidal suspensions: capabilities and limitations. *Colloids Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects*, 1997, vol. 120, pp. 27–46.
- RD 52.24.468-2005. *Vzveshennye veschestva i obshee soderzhanie primesey v vode. Metod izmereniya mass kontsentratsii gravimetricheskiy* [Suspended solids and overall content of admixtures in water. Gravimetric measurement of the mass content]. Rostov-Don, Hydromet Publ., 2005. 17 p.
- Gordeev V.V. *Geokhimiya sistemy reka-more* [Geochemistry of the river-sea system]. Moscow, Matushkin Publ., 2012. 452 p.
- Krickov I.V., Lim A.G., Manasypov R. M., Loiko S.V., Vorobyev S.N., Shevchenko V.P., Dara O.M., Gordeev V.V., Pokrovsky O.S. Major and trace elements in suspended matter of western Siberian rivers: first assessment across permafrost zones and landscape parameters of watersheds. *Geochim. et Cosmochim. Acta*, 2020, vol. 269, pp. 429–450.
- Horowitz A.J. A review of selected inorganic surface water quality-monitoring practices: are we really measuring what we think, and if so, are we doing it right? *Environ. Sci. Technol.*, 2013, vol. 47, pp. 2471–2486.
- Shulkin V., Bogdanova N., Elovskiy E. Influence of clogging at the filtration on analysis of dissolved and particulate forms of chemical elements in boreal rivers of the Russian Far East. *Minerals*, 2022, vol. 12, pp. 773–792.
- Droppo I.G., Nackaerts K., Walling D.E., Williamset N. Can flocs and water stable soil aggregates be differentiated within fluvial systems? *Catena*, 2005, vol. 60, pp. 1–18.
- Nguyen D.N., Grybos M., Rabiet M., Deluchat .. How do colloid separation and sediment storage methods affect water mobilizable colloids and phosphorus? An insight into dam reservoir sediment. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2020, vol. 606, p. 125505.
- Xu R. Light scattering: a review of particle characterization applications. *Particuology*, 2015, vol. 18, pp. 11–21.
- Anderson W., Kozak D., Coleman V.A. A comparative study of submicron particle sizing platforms: Accuracy, precision and resolution analysis of polydisperse particle size distributions. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2013, vol. 405, pp. 322–330.
- Langevina D., Raspauda E., Mariota S. Towards reproducible measurement of nanoparticle size using dynamic light scattering: Important controls and considerations. *NanoImpact*, 2018, vol. 10, pp. 161–167.
- GOST R 8.774-2011. *Dispersny sostav zhidkih sred. Opredelenie razmera chastits po dinamicheskomu rasseyaniiyu sveta* [SS R 8.774-2011. Particle composition of the liquids. Determination of the particles size by dynamic light scattering]. Moscow, StandardInform Publ., 2019. 36 p.
- Kulikov K.G., Koshlan T.V. Determination of the colloidal particles size by dynamic light scattering. *Journal of technical physics*, 2015, vol. 85, no. 12, pp. 26–32. In Rus.
- Schmitz K.S. *An introduction to dynamic light scattering by macromolecules*. Boston, Academic Press, 1990. 472 p.
- Bhattacharjee S. DLS and zeta potential – What they are and what they are not. *Journal of Controlled Release*, 2016, vol. 235, pp. 337–351.

18. Mihailik T.A., Tishchenko P.Ya., Koltunov A.M., Tishchenko P.P., Shvetsova M.G. Influence of Razdolnaya River on the ecological state of the Amursky Bay (Sea of Japan). *Water Resources*, 2011, no. 4, pp. 474–484. In Rus.
19. Shulkin V.M., Bogdanova N.N., Perepelyatnikov L.V. Spatial-temporal variability of the chemical composition of river waters within south part of the Russian Far East. *Water Resources*, 2009, no. 4, pp. 1–12. In Rus.
20. Shulkin V.M., Bogdanova N.N., Elovskiy E.V. Effect of filter clogging on the determination of concentrations of chemical elements migrating in river water as components of true solutions or in colloidal forms. *Water Resources*, 2022, vol. 49, pp. 122–133.
21. Shesterkin V.P., Shesterkina N.M. Seasonal and spatial variability of the ammonium nitrogen content in the Amur river near Khabarovsk in 2018–2019. *Pacific Geography*, 2020, no. 3, pp. 56–62. In Rus.
22. Gimbert L.J., Haygarth P.M., Beckett R., Worsfold P.J. Comparison of centrifugation and filtration techniques for the size fractionation of colloidal material in soil suspensions using sedimentation field-flow fractionation. *Environ. Sci. Technol.*, 2005, vol. 39, no. 6, pp. 1731–1735.
23. Kaszuba M., Connah M.T., McNeil-Watson F.K., Nobbmann U. Resolving concentrated particle size mixtures using dynamic light scattering. *Particle & Particle Systems Characterization*, 2007, vol. 24.3, pp. 159–162.

Received: 22 February 2023.

Reviewed: 10 April 2023.

Information about the authors

Vladimir M. Shulkin, Dr. Sc., head of the geochemistry laboratory, Pacific Geographical Institute, Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences.

УДК 553.98.048-047.58

ТЕХНОЛОГИЯ 3D-МОДЕЛИРОВАНИЯ НАЧАЛЬНОЙ НЕФТЕНАСЫЩЕННОСТИ В ПЕРЕХОДНОЙ ВОДОНЕФТЯНОЙ ЗОНЕ ПО КОМПЛЕКСУ МЕТОДОВ КАПИЛЛЯРИМЕТРИИ И ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО КАРОТАЖА

Потехин Денис Владимирович^{1,2},
Denis.Potekhin@pnn.lukoil.com

Ширяев Евгений Олегович³,
Shiriaev.EO@pnsh.ru

Галкин Сергей Владиславович²,
doc_galkin@mail.ru

¹ Филиал ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг» «ПермНИПИнефть»,
Россия, 614015, г. Пермь, ул. Пермская, 3а.

² Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Россия, 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29.

³ ООО «ПИТЦ «Геофизика»,
Россия, 614000, г. Пермь, ул. Петропавловская, 16А.

Актуальность. 3D-распределение начальной нефтенасыщенности в объеме залежи является одним из ключевых элементов геолого-технологического моделирования, во многом определяя качество последующих проектных решений разработки. В публикации представлен анализ современного состояния проблемы изучения водонефтяной переходной зоны и распределения в ней нефтенасыщенности. Показано, что для терригенных гидрофильных коллекторов электрический боковой каротаж достаточно надежно контролирует флюидонасыщение пустотного пространства нефтяной части залежи, что предполагает возможность его использования при прогнозе совместно с методом капилляриметрии. Разработка методологии комплексного учета при определении нефтенасыщенности удельных электрических сопротивлений пород по данным геофизических исследований скважин и капилляриметрических исследований керна позволяет повысить достоверность 3D-геологического моделирования нефтяных залежей.

Цель: оценить возможность достоверного определения нефтенасыщенности терригенных гидрофильных коллекторов путем комплексирования данных электрического бокового каротажа, фильтрационно-емкостных свойств коллекторов и капилляриметрических исследований керна, построить 3D-модель распределения начальной нефтенасыщенности коллекторов в нефтяной залежи с учетом выделения водонефтяной переходной зоны.

Объект: нефтенасыщенные терригенные коллекторы нефтяной залежи (Пермский край).

Методика: многомерное математическое моделирование при разработке методологии определения начальной нефтенасыщенности коллекторов на основе комплекса геофизических исследований скважин и капилляриметрических исследований керна, построение 3D-распределения начальной нефтенасыщенности залежи с учетом параметров водонефтяной переходной зоны.

Результаты. Авторами на основе разработанной методики для залежи пласта Бб Аспинского месторождения построена 3D-модель распределения начальной нефтенасыщенности. Для изученной залежи проведен анализ распределения зон свободного насыщения, недосыщения, переходной зоны и предельного нефтенасыщения. Полученная 3D-модель может использоваться при геолого-технологическом моделировании разработки нефтяной залежи.

Ключевые слова:

Геологическое моделирование, переходная водонефтяная зона, нефтенасыщенность, водонасыщенность, метод капилляриметрии, геофизические исследования скважин, удельное электрическое сопротивление, боковой электрический каротаж.

Введение

Формирование начального положения водонефтяного контакта (ВНК) контролируется особенностями строения переходных зон на границе вода–нефть. Под переходной водонефтяной зоной обычно понимают объем продуктивного пласта с водонасыщенностью (K_v), изменяющейся от 100 % у зеркала свободной воды до остаточной водонасыщенности ($K_{ов}$) в нефтяной части залежи. Таким образом, мощность переходной водонефтяной зоны соответствует ее высоте над уровнем зеркала свободной воды ($H_{у\text{св}}$).

До активного внедрения технологий цифрового геологического 3D-моделирования для залежей Волго-Уральской нефтегазоносной провинции величины

$H_{у\text{св}}$ оценивались как невысокие (менее 1 м), близкие к разрешающей способности структурных построений. При таком подходе геологическая модель упрощалась, а поверхность ВНК для всей залежи принималась горизонтальной на уровне, выше которого при опробовании получают чистую нефть. Стандартом определения коэффициента начальной нефтенасыщенности (K_n) для всего объема залежи выше ВНК являлся расчет по формуле $K_n = 1 - K_{ов}$. В свою очередь $K_{ов}$ определялся на основе исследований керна через зависимость от коэффициента пористости $K_{ов} = f(K_p)$ [1, 2]. Согласно современным представлениям в условиях гидрофильных коллекторов в зависимости от их неоднородности и проницаемости $H_{у\text{св}}$ может изме-

няться в широких пределах [3], для залежей Пермского региона часто превышая 5–10 м. С учетом этого достоверное определение переходных или недонасыщенных зон в совокупности с распределением K_n в 3D-модели залежи имеют определяющее значение при проведении геолого-технологического моделирования [4, 5].

Известно, что распределение воды и нефти в пластовых условиях происходит под совместным влиянием гравитационных и капиллярных сил. Гравитационное распределение приводит к заполнению более легкими флюидами (газ, нефть) повышенных объемов залежи. Однако в гидрофильной поровой среде действие капиллярных сил, возникающих на границе нефть–вода, приводит к подъему воды выше уровня гравитационного распределения флюидов. По характеру флюидонасыщения коллекторов в разрезе нефтяной залежи выделяют области:

- зона свободного насыщения, где все связанное поровое пространство заполнено водой ($K_n=0$; $K_v=1$);
- зона недосыщения, в пределах которой K_n увеличивается от нуля на нижней границе до значения остаточной нефтенасыщенности ($K_{но}$) при критическом K_v^* на верхней границе ($0 < K_n < K_{но}$; $1 > K_v > K_v^*$);
- переходная зона, в пределах которой K_n увеличивается от значения $K_{но}$ до заполнения всех открытых пор на верхней границе ($K_{но} < K_n < 1 - K_{ов}$; $K_v^* > K_v > K_{ов}$);
- зона предельного нефтенасыщения в повышенных участках залежи, где вся вода является капиллярно связанной ($K_v=K_{ов}$) [6–8].

Для зон свободного и недонасыщения относительная фазовая проницаемость (k) по нефти равна нулю, при их испытаниях получают притоки чистой воды. В переходной зоне при испытаниях получают двухфазные притоки нефти и воды. В зоне предельного нефтенасыщения подвижной фазой является нефть, которую и получают при испытаниях скважин.

В коллекторах с большим радиусом пор капиллярное давление (P_k) на границе фаз незначительно, ввиду чего смачивающая фаза поднимается на сравнительно малую высоту. В условиях поровых каналов малого диаметра P_k растет более интенсивно, что приводит к подъему воды в нефтяную зону залежи, где фактическая водонасыщенность превышает значение $K_{ов}$. Таким образом, подъем воды увеличивается при уменьшении радиуса пор, что сопоставимо с повышенными фильтрационно-емкостными свойствами (ФЕС). В работе [9] приведена схема нефтяной залежи, согласно которой высота зон насыщения над уровнем свободной воды последовательно смещается вверх залежи по мере снижения ФЕС коллекторов.

Анализ современного опыта 3D-моделирования распределения начальной нефтенасыщенности

На ранних этапах развития 3D-моделирования распределение K_n в объеме залежи выполнялось с учетом зависимости снижения значений с глубиной до остаточной нефтенасыщенности ($K_{но}$) на уровне

принятого ВНК. В современной практике для терригенных коллекторов в значительной степени распространены методические подходы, при которых определения K_v проводятся по комплексу геофизических исследований скважин (ГИС), что позволяет проследить динамику изменения флюидонасыщения в геологическом разрезе. За рубежом одним из основных методов ГИС при оценке $K_{ов}$ является метод ядерного магнитного резонанса (ЯМР) [10–12]. В отечественной практике ЯМР достаточно широко применяется для оценки структуры пустотного пространства при кернах исследованиях [13], однако исследования в скважинах при этом ограничиваются лишь рядом нефтегазоносных регионов [14, 15]. При исследованиях стандартным комплексом ГИС наиболее тесно связаны со значениями $K_{ов}$ пород показания удельного электрического сопротивления (УЭС), которые определяются обычно по боковому электрическому каротажу (БК).

Для нефтенасыщенных коллекторов УЭС определяется объемом и структурой порового пространства, занятого водной фазой. Для неглинистых коллекторов, согласно уравнению Арчи–Дахнова, связь сопротивления с пористостью и водонасыщенностью имеет степенной вид:

$$УЭС = \rho_v \cdot T \cdot K_n^{-m} \cdot K_v^{-n},$$

где ρ_v – сопротивление пластовой воды, Ом·м; T – извилистость токопроводящих каналов; K_n – коэффициент пористости, д. ед.; m – структурный коэффициент; K_v – коэффициент водонасыщенности, д. ед.; n – показатель смачиваемости [16].

Согласно работам [17, 18] при значениях $n > 2$ нефтенасыщенные коллекторы можно считать гидрофобизированными. В работе [19] на основе экспериментов изменения смачиваемости образцов керна показано, что уже при частичной гидрофобизации коллекторов на показания УЭС в наибольшей степени влияет именно их гидрофобизация. Выполненный для территории исследования в работах [20–22] анализ сопоставления смачиваемости терригенных нефтенасыщенных коллекторов по керну с показаниями БК показал, что даже частичная гидрофобизация ведет к резкому росту УЭС (до 200 Ом·м и более), что приводит к неприемлемым погрешностям оценки $K_{ов}$. Для гидрофильных коллекторов на расчетные значения УЭС наибольшее влияние оказывают водонасыщенность и пористость [23].

Таким образом, для гидрофильных коллекторов ($n < 2$) показания УЭС достоверно контролируют флюидонасыщение порового пространства. Необходимо заметить, что при определении $K_{ов}$ по УЭС важно учитывать текущее состояние разработки эксплуатационного объекта. Скважины, пробуренные в поздний период эксплуатации залежи на участках, затронутых заводнением пласта, необходимо исключать из анализа распределения начальной нефтенасыщенности. Для установления промытых зон, помимо контроля за разработкой пласта, также должны привлекаться результаты адаптации модели на гидродинамическом симуляторе.

В работе [9] приведена классификация и сделан анализ эффективности применения различных методик оценки K_n . Для залежей с небольшим размером зоны предельного нефтенасыщения и высокой анизотропией ФЕС рекомендовано использовать методики из работ [8, 24, 25], основанные на зависимостях, где аргументами выступают параметры $H_{у\text{св}}$ и K_n . Прогноз в условиях значительных толщин переходных водонефтяных зон рекомендуется выполнять с использованием многомерной зависимости $K_n = f(K_n, k, P_k, H_{у\text{св}})$. В данном случае применение капиллярной модели настраивается на параметры ФЕС пород с учетом высоты их залежания над уровнем зеркала воды. Уровень ВНК в объеме залежи условно принимается за горизонтальную поверхность, что с ростом толщины переходной зоны все в меньшей степени соответствует действительности. Кроме этого, ввиду недостоверного учета ФЕС по объему залежи используемые в расчетах кривые капиллярных давлений не полностью соответствуют глубине зеркала воды реальной залежи.

Капиллярные исследования в коллекторах с разным диапазоном ФЕС имеют различную форму (крутизну) кривых $P_k = f(K_n)$, при этом возникает неопределенность с их выходом на асимптоту для определения $K_{ов}$. Для приведения облака данных кривых и их описания в виде функции используют различные методы стандартизации. Существует несколько математических моделей, описывающих связь кривой капиллярного давления с петрофизическими параметрами. В России наиболее широкое применение получили модели на основе функций Бакли–Левретта и Брукс–Кори.

Применение J -функции Бакли–Левретта [26, 27] позволяет нормализовать значения P_k по пропласткам с различными значениями пористости, проницаемости и физических свойств жидкости:

$$J = \frac{3,183 \cdot P_k \cdot \sqrt{k/K_n}}{\gamma \cdot \cos \theta},$$

где J – функция Левретта; P_k – капиллярное давление, 10^5 Па; k – коэффициент проницаемости, $\text{мкм}^2 \cdot 10^{-3}$; K_n – коэффициент пористости, д. ед.; γ – поверхностное натяжение на границе нефть – пластовая вода, кг/см^2 ; θ – угол смачиваемости, град.

При аппроксимации кривых капиллярного давления по методике Брукс–Кори каждая кривая описывается функцией со своим коэффициентом кривизны капиллярных кривых в зависимости от размеров пор [28, 29].

Анализ практического применения методик Левретта и Брукс–Кори показывает их не всегда хорошую взаимную сходимость и значительное влияние на результаты даже небольших изменений ФЕС пород. Поэтому для участков залежи с разными ФЕС по аппроксимирующим математическим моделям Бурдайна кривые капиллярных давлений обычно трансформируются в кривые относительных фазовых проницаемостей (ОФП). Для определения границ зон насыщения коллекторов, согласно методическим рекомендациям [30], по данным исследований ядра строится номограмма сопоставления K_n – K_b с критическими значениями K_b^* . Расчет выполняется на основе пересчета P_k для каждого уровня начиная от зеркала воды. При этом предпо-

лагается, что, зная распределение зон насыщения в объеме залежи, для каждого нефтенасыщенного пропластка можно оценить его местоположение в геологическом разрезе ($H_{у\text{св}}$) и величину K_n .

Разработка комплексного подхода учета данных ГИС и капилляриметрических исследований при 3D-моделировании начальной нефтенасыщенности

Отработка методики 3D-моделирования начальной нефтенасыщенности выполнялась на примере нефтяной залежи пласта Бб Аспинского месторождения (Пермский край), коллекторы которой представлены песчаниками. При проведении подсчета запасов нефти на начальной стадии эксплуатации залежи (1976 г.) был принят горизонтальный ВНК. Однако впоследствии анализ скважин, выходящих из бурения, показал зависимость показаний УЭС нефтенасыщенных интервалов от их гипсометрических отметок. С учетом этого при современном подсчете запасов (2020 г.) ВНК принят наклонным с перепадом абсолютных отметок по залежи 10 м. Вместе с тем принятое наклонное положение ВНК для ряда участков залежи противоречит истории эксплуатации скважин, что в том числе установлено при проведении адаптации геолого-технологической модели.

Как было показано выше, используемые при моделировании K_n методические подходы имеют различные физические основы. Методы на основе капилляриметрии ядра позволяют моделировать флюидонасыщение емкостного пространства, учитывая ФЕС пород и их гипсометрическое положение относительно ВНК. Электрические методы ГИС характеризуют динамику изменения проводимости пород с глубиной в геологическом разрезе. Необходимо заметить, что анализ исследований методом БК для нефтенасыщенных интервалов залежи показал, что показания УЭС во всех случаях не превышают 120 Ом·м, что, согласно [21], позволяет судить об отсутствии гидрофобизации. Лабораторные исследования ядра подтверждают гидрофильность пород, согласно им по эмпирической зависимости Арчи–Дахнова параметр смачиваемости $n=1,74$ ($n < 2$). Соответственно для всего объема нефтенасыщенных коллекторов пласта Бб показания УЭС являются информативными при оценке K_b .

Таким образом, при прогнозе K_b и K_n имеется принципиальная возможность совместного использования обоих типов исследований, что и поставлено основной задачей работы. При анализе ядерных данных привлечены капилляриметрические исследования 70 образцов с широким диапазоном ФЕС (K_n от 7,2 до 26,8 %, k от 0,5 до 3295 мкм^2). Значения K_b снимались на 12 последовательных ступенях давления дренирования P_k от 0,005 до 1,2 МПа, общий массив данных составил 840 экспериментов (70×12). В экспериментах во всем диапазоне ФЕС ядерных считалось, что остаточная водонасыщенность формируется до значений 1,2 МПа. При этом, согласно методическим указаниям [31], значения P_k в экспериментах пересчитывались по зависимости:

$$H_{у\text{св}} = \frac{10 \cdot P_k \cdot \sigma_{пл}}{d_b - d_n \cdot \sigma_{лаб}},$$

где P_k – капиллярное давление в эксперименте на керне, МПа; $\sigma_{пл}$ и $\sigma_{лаб}$ – поверхностные натяжения на границе раздела нефть–вода при пластовых условиях и экспериментах на кернах, $\sigma_{пл}=20$ дин/см, $\sigma_{лаб}=73$ дин/см; d_v и d_n – плотности воды и нефти при пластовых условиях, г/см³.

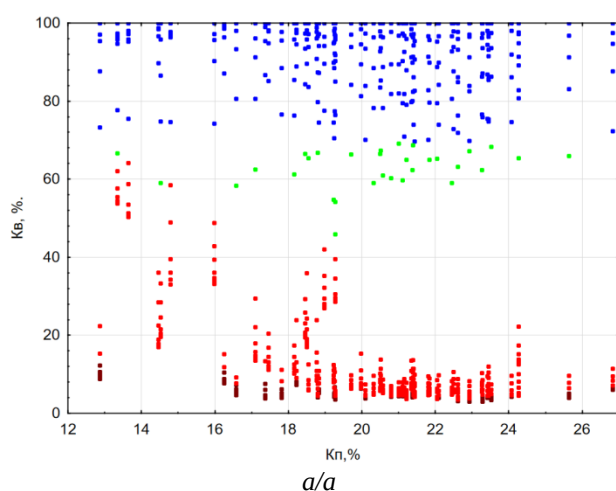
Отнесение единичных экспериментов к стадиям насыщения проводилось путем построения зависимостей ОФП и получения на их основе критических значений $K_{в*}$. В результате 346 определений (41 %) отнесено к зоне сводного водонасыщения, 31 (4 %) – к зоне недонасыщения, 327 (39 %) – к переходной водонефтяной зоне, 136 (16 %) – к зоне предельного нефтенасыщения.

По примеру рекомендаций [30] по результатам проведенных экспериментов приведено сопоставле-

ние определений $K_{п}$ и $K_{в}$. Из рис. 1, а видно, что зоны различного насыщения группируются в диапазонах различных $K_{в}$. При этом в пределах самих зон зависимости $K_{п}$ от $K_{в}$ характеризуются низкой сходимостью, что показывает целесообразность использования при прогнозе $K_{в}$ не $K_{п}$, а показателя, характеризующего в большей степени площадь фильтрации капилляров. Согласно теоретическим представлениям для идеальной пористой среды (без учета извилистости пор) в качестве такого параметра может быть рассмотрен радиус поровых каналов коллекторов:

$$R_{пор} = 2,86 \cdot \sqrt{k/K_{п}},$$

где $R_{пор}$ – радиус поровых каналов, мкм; k – коэффициент проницаемости, мкм²·10⁻³; $K_{п}$ – коэффициент пористости, д. ед.



Условные обозначения:

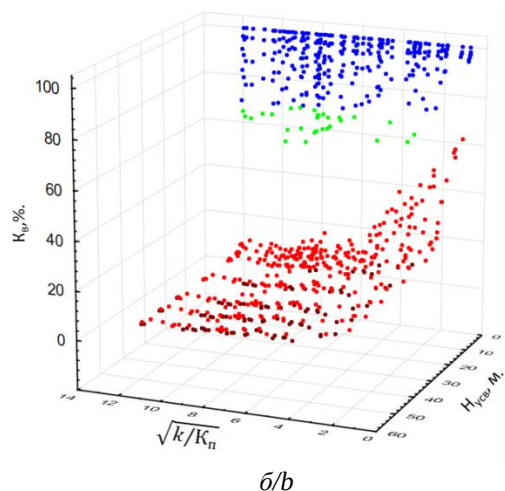
- – зона свободного насыщения
- – зона недонасыщения
- – переходная зона
- – зона предельного насыщения

Рис. 1. Изменение коэффициента водонасыщенности по данным капилляриметрии в зависимости от ФЕС и $H_{усв}$: а) $K_{в} \% - (K_{п} \%)$; б) $K_{в} \% - (\sqrt{k/K_{п}}, H_{усв})$

Fig. 1. Change in the water saturation coefficient according to the capillarimetry method: а) $K_{в} \% - (K_{п} \%)$; б) $K_{в} \% - (\sqrt{k/K_{п}}, H_{усв})$

Следует заметить, что $\sqrt{k/K_{п}}$ является фактически основным параметром, характеризующим J-функцию Бакли–Левретта, так как остальные множители являются в ней константами. Поэтому в дальнейших расчетах использован именно показатель $\sqrt{k/K_{п}}$, который, в отличие от $K_{п}$, характеризует не только объем пустот, но и размеры капилляров.

Для комплексного учета влияния капиллярных сил, в том числе их изменения с глубиной, на рис. 1, б представлены результаты экспериментов с получением кривых капиллярных давлений в трехмерном пространстве показателей $H_{усв}$, $K_{п}$ и $\sqrt{k/K_{п}}$. С учетом размеров предполагаемой переходной водонефтяной зоны поле точек для наглядности установленных процессов ограничено условием $H_{усв} < 10$ м. В результате из рис. 1, б видно, что значения $K_{в}$ для зон свободного насыщения и недонасыщения находятся в плоскости, параллельной осям $K_{в}-\sqrt{k/K_{п}}$. Поля точек

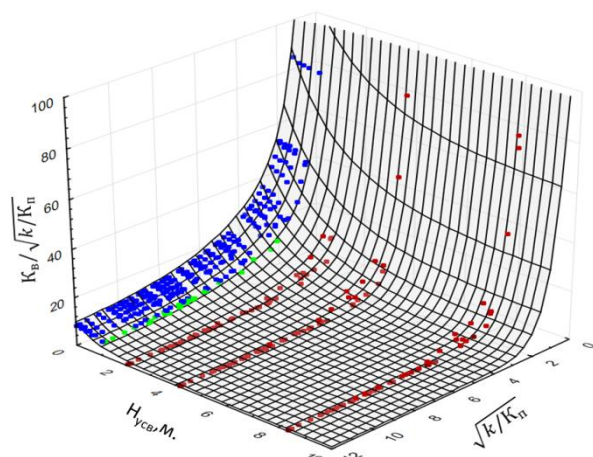


для данных зон ограничены значениями $H_{усв}$ менее 1 м. Причем для всего диапазона ФЕС изменение $K_{в}$ происходит постепенно с небольшим наклоном относительно оси $H_{усв}$. Физически это объяснимо тем, что при низких P_k (менее 0,4 МПа) насыщенные образцы во всем диапазоне ФЕС отдают воду равномерно.

Во всех случаях при значениях $H_{усв}$ более 2 м результаты экспериментов отнесены к переходной зоне и зоне предельного насыщения. Из рис. 1, б видно, что для полей точек в данном случае характерен принципиально иной вид. При $\sqrt{k/K_{п}} > 5$ они преимущественно распределены параллельно плоскости $\sqrt{k/K_{п}} > 5 - H_{усв}$, что свидетельствует о равномерной отдаче флюида при высоких ФЕС. При $\sqrt{k/K_{п}} < 5$ поле точек находится в плоскости $H_{усв}-K_{в}$, что объяснимо при низких ФЕС влиянием капиллярных сил на процессы распределения флюидов.

В целом установленные закономерности позволяют сделать вывод, что на формирование переходной

зоны и распределение в ней нефтенасыщенности значимо влияют капиллярные силы, которые прежде всего связаны с радиусом поровых каналов. С учетом этого в дальнейшем аргументом в математических моделях являлись не сами значения K_b , а комплексный параметр $K_b/\sqrt{k/K_p}$. Ввиду того, что знаменатель данного показателя пропорционален радиусу поровых каналов, его физический смысл заключается в оценке K_b пород в зависимости от гипсометрического положения выше ВНК ($H_{усв}$) за вычетом влияния ФЕС. На рис. 2 в графическом виде представлено распределение его значений в зависимости от $\sqrt{k/K_p}$ и $H_{усв}$, из которого в том числе видно закономерное группирование полей точек в зависимости от зон насыщения.



Условные обозначения:

- – зона свободного насыщения
- – зона недонасыщения
- – переходная зона
- – зона предельного насыщения

Рис. 2. Изменение комплексного показателя в зависимости ФЕС и $H_{усв}$

Fig. 2. Diagram of changes in the complex indicator depending on FCP and H_{usv}

На следующем этапе по данным статистической выборки из 840 керновых экспериментов проведено

многомерное моделирование, при котором прогнозным показателем являлся показатель $K_b/\sqrt{k/K_p}$. Подбор параметров математической модели реализован для скалярной функции с несколькими переменными на основе последовательного квадратичного программирования, что выполнялось с привлечением программных средств пакета Scipy.optimize на языке Python, а также специализированных пакетов обработки статистических данных. В результате получена многомерная зависимость:

$$K_b/\sqrt{k/K_p} = 100(2,59 \cdot \exp(-16,9\sqrt{k/K_p}/10) + 0,075 \exp(-13,53H_{усв}/10) +$$

$$+ 0,727 \exp(-3,23\sqrt{k/K_p}/10) \exp(-4,20H_{усв}/10) + 0,009)$$

при значении коэффициента множественной корреляции $R=0,97$; $N=840$.

Полученная зависимость с высокой достоверностью описывает изменение параметра $K_b/\sqrt{k/K_p}$ на основе данных метода капилляриметрии в любой точке 3D-пространства модели. Необходимо заметить, что при попытках построения аналогичных прогнозных моделей без преобразований показателя K_b их достоверность, согласно статистическим оценкам, значительно ниже ($R<0,85$ против $R=0,97$).

Для практического применения многомерной модели необходимо предварительно на основе данных УЭС в скважинах определить положение уровня зеркала воды. Вероятный диапазон абсолютных отметок $H_{усв}$ для залежи Бб Аспинского месторождения определен с учетом принятого в подсчете запасов наклонного ВНК в диапазоне от -1283 до -1297 м. Последовательно через 1 м проведена серия экспериментов, на каждой итерации которых сопоставлялись значения, полученные по данным ГИС и по модельным зависимостям. При этом прогноз выполнялся в двух вариантах для прогнозных моделей K_b и $K_b/\sqrt{k/K_p}$. Результаты представлены в таблице, из которой видно, что в обоих случаях максимальная теснота соответствия модели и данных ГИС установлена для глубины -1294 м. При этом также видно, что для модели $K_b/\sqrt{k/K_p}$ теснота с данными ГИС заметно выше ($r=0,88$), чем для не модифицированной модели с K_b ($r=0,65$).

Таблица. Проведение эксперимента по определению уровня зеркала воды

Table. Conducting an experiment to determine the level of pollutants

Уровень зеркала свободной воды $H_{усв}$, м Free water level, H_{usv} , m	Кол-во определений по данным интерпретации ГИС Determinations by the data of GIS interpretations	K_b (ГИС)= $f(K_{b\text{мод}})$, %		$K_b/\sqrt{k/K_p}$ (ГИС)= $f(K_b/\sqrt{k/K_{p\text{мод}}})$	
		Уравнение/Equation	r	Уравнение/Equation	r
-1283	32	$y=0,62x+20,09$	0,17	$y=2,18x+0,51$	0,86
-1284	36	$y=1,18x+12,15$	0,35	$y=1,90x+0,71$	0,87
-1285	40	$y=1,03x+13,50$	0,28	$y=1,70x+1,04$	0,87
-1286	42	$y=1,37x+3,56$	0,65	$y=1,62x+0,26$	0,85
-1287	46	$y=1,40x+2,51$	0,62	$y=1,92x-0,73$	0,85
-1288	48	$y=1,12x+3,91$	0,57	$y=1,70x-0,51$	0,86
-1289	50	$y=0,87x+5,82$	0,50	$y=1,55x-0,67$	0,86
-1290	52	$y=0,78x+4,63$	0,55	$y=1,47x-0,99$	0,86
-1291	54	$y=0,65x+7,19$	0,35	$y=1,40x-0,79$	0,86
-1292	55	$y=0,73x+3,41$	0,61	$y=1,29x-1,06$	0,86
-1293	59	$y=0,77x+3,85$	0,64	$y=1,19x-0,39$	0,87
-1294	61	$y=0,65x+5,37$	0,65	$y=1,08x-0,14$	0,88
-1295	62	$y=0,57x+5,27$	0,56	$y=1,42x-2,08$	0,85
-1296	63	$y=0,58x+3,84$	0,64	$y=1,26x-1,83$	0,87
-1297	64	$y=0,45x+6,17$	0,49	$y=1,16x-1,35$	0,85

Еще более наглядно преимущества использования показателя $K_v/\sqrt{k/K_p}$ при моделировании демонстрирует анализ рис. 3, на котором для глубины –1294 м приведено сопоставление результатов модельных расчетов с определением параметров по ГИС. Для

моделей с показателем K_v , помимо низкой корреляции, в целом наблюдается занижение модельных значений относительно определений по ГИС (не соответствие синей и красной линий на рис. 3, а).

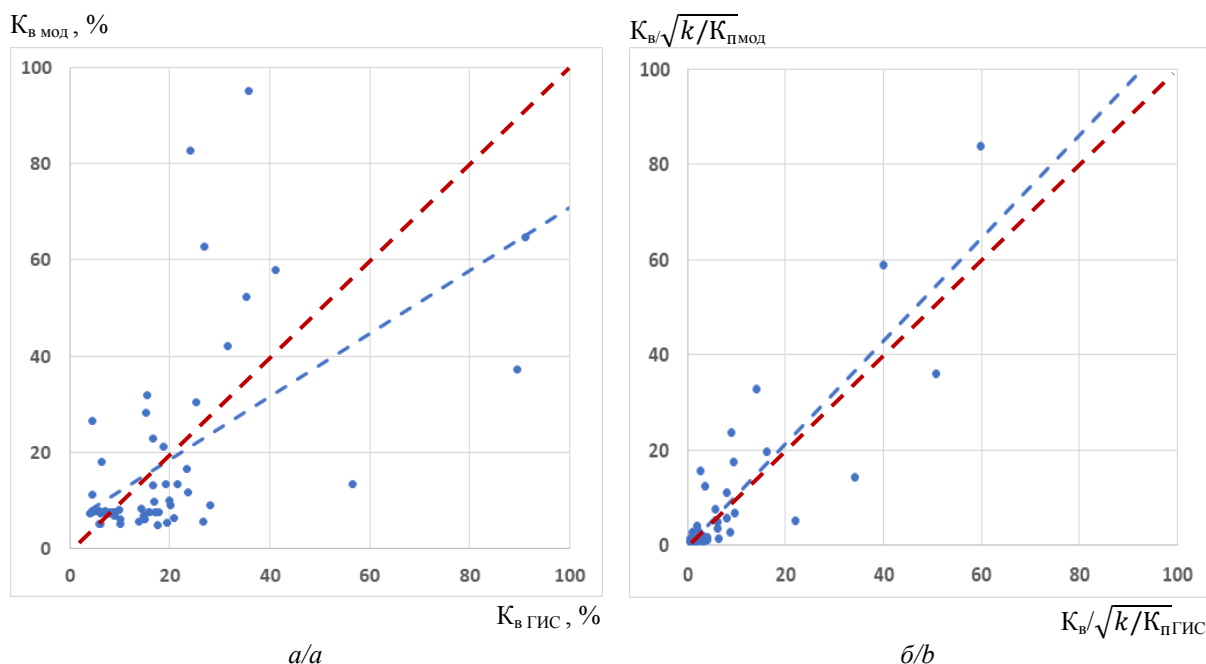


Рис. 3. Сопоставление данных: а) $K_v(\text{УЭС})$ и $K_v(\text{Рк})$; б) $K_v/\sqrt{k/K_p}$ (УЭС) и $K_v/\sqrt{k/K_p}$ (Рк)

Fig. 3. Data matching: а) $K_v(\text{SER})$ and $K_v(\text{P}_c)$; б) $K_v/\sqrt{k/K_p}$ (SER) and $K_v/\sqrt{k/K_p}$ (P_c)

Для моделей $K_v/\sqrt{k/K_p}$ линия тренда практически совпадает с линией равных значений по модели и ГИС (рис. 3, б). Отсутствие систематической ошибки в определении показателя $K_v/\sqrt{k/K_p}$ также следует из вида полученной зависимости, для которой наблюдается приближение углового члена уравнения к единице (табл. 1). Таким образом, максимальное соответствие результатов моделирования с данными ГИС установлено на глубине –1294 м, что позволяет считать данную абсолютную отметку наиболее вероятным положением зеркала воды. С учетом этого в дальнейшем расчетные значения $H_{\text{усв}}$ при моделировании отстраивались от глубины –1294 м.

После получения 3D-распределения $H_{\text{усв}}$ во всем объеме залежи по полученной многомерной зависимости произведен расчет значений показателя $K_v/\sqrt{k/K_p}$. Затем с учетом определений по ГИС показателей k и K_p последовательно оценены модельные значения K_v и K_p . В результате для залежи пласта Бб Аспинского месторождения с учетом моделирования строения переходной водонефтяной зоны построена 3D-модель распределения K_v . В целом модель в сравнении со стандартной является более неоднородной. Диапазон значений K_v в ней существенно расширяется, что отражает более сложное строение переходной водонефтяной зоны. Результаты 3D-моделирования K_v представлены на рис. 4, 5.

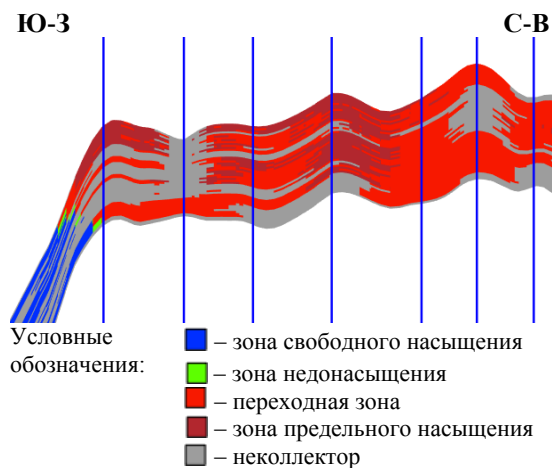


Рис. 4. Распределение зон различных типов насыщения в пределах Аспинского месторождения, пласт Бб2

Fig. 4. Distribution of saturation zones within the Aspinsky oil field, reservoir Bb2

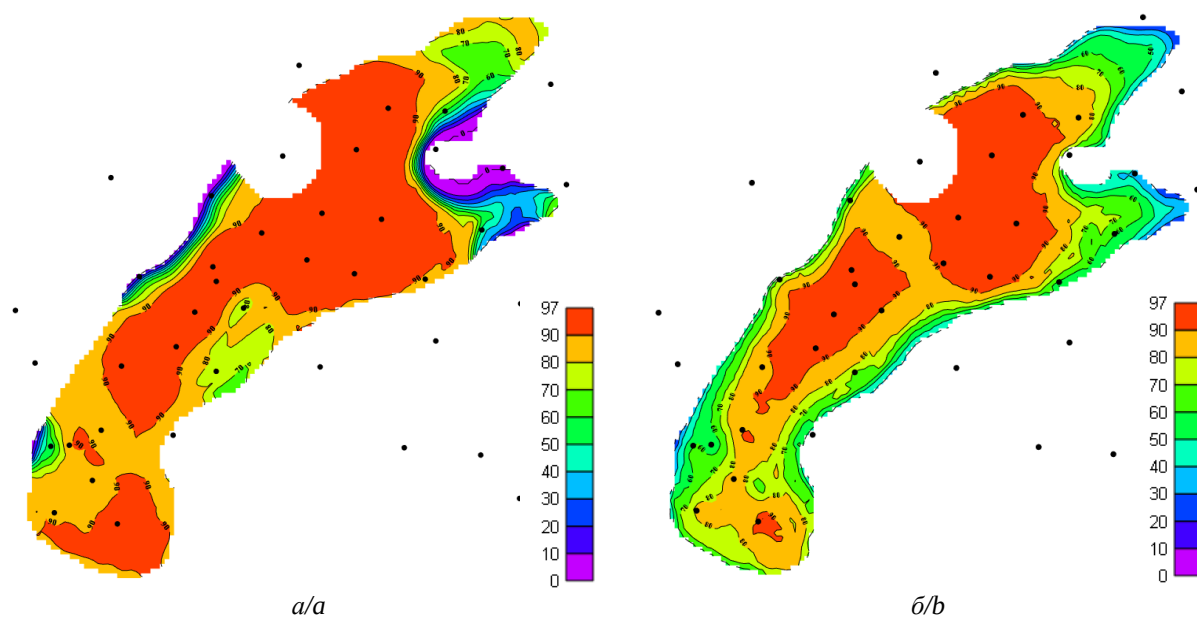


Рис 5. Распределение нефтенасыщенности в пределах Аспинского месторождения, пласт Бб2: а) модель распределения нефтенасыщенности согласно данным на 2020 г.; б) новая модель распределения нефтенасыщенности

Fig. 5. Distribution of oil saturation within the Aspinsky oil field reservoir Bb2: a) oil saturation distribution model 2020; b) new oil saturation distribution model

Как видно из геологического профиля (рис. 4), в пределах центральной части залежи установлены участки с зонами предельного насыщения, которые в структурном плане, как правило, связаны с наличием небольших локальных поднятий.

На рис. 5 приведено полученное на основе 3D-моделей сопоставление средней нефтенасыщенности по площади залежи при стандартном и реализованном подходе. Ввиду того, что в новой 3D-модели уровень зеркала воды находится ниже ранее принятого ВНК, продуктивная толщина нефтяной залежи увеличивается на 1,5 м. Однако, как видно из рис. 6, б, в северо-восточной части залежи увеличивается толщина переходной зоны. Кроме этого, зона предельного нефтенасыщения для стандартной модели занимает практически всю центральную часть залежи, тогда как в новой модели лишь ее наиболее повышенные участки. В результате осредненное по залежи значение K_n снижается с 90 до 85 %. В конечном итоге фактор уменьшения K_n в большей степени влияет на структуру начальных геологических запасов, которые по залежи снижаются на 5 %.

Заключение

В результате исследований установлено, что при определении начальной нефтенасыщенности терригенных гидрофильных коллекторов можно комплексировать данные методов бокового электрического

каротажа и капилляриметрических исследований керна. Для решения данной задачи привлечены методы многомерно математического моделирования, при реализации которых в качестве основного критерия, контролирующего ФЕС пород и соответственно влияние капиллярных сил, использован комплексный показатель $\sqrt{k/K_n}$, характеризующий размеры порового пространства.

На основе разработанной методики для залежи пласта Бб Аспинского месторождения построена 3D-модель распределения начальной нефтенасыщенности. Анализ распределения зон с различным типом насыщения пустотного пространства показывает, что 6 % объема залежи относится к зоне недонасыщения, 72 % – к переходной водонефтяной зоне, 22 % – к зоне предельного нефтенасыщения. В целом при моделировании строения переходной зоны структура запасов нефтяной залежи изменилась в значительной степени. Полученная цифровая 3D-модель более достоверно отражает неоднородность залежи и может использоваться как при подсчете запасов, так и при геолого-технологическом моделировании ее разработки.

Исследование выполнено в рамках государственного задания Минобрнауки РФ FSNM-2023-0005 на выполнение фундаментальных научных исследований на 2023 г. и плановый период 2024 и 2025 гг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Закревский К.Е., Попов В.Л. История развития трехмерного геологического моделирования как метода изучения залежей нефти и газа // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 5. – С. 89–100.
2. Репина В.А., Галкин В.И., Галкин С.В. Применение комплексного учета петрофизических характеристик при адаптации геолого-гидродинамических моделей (на примере визейской залежи Гондыревского месторождения нефти) // Записки Горного института. – 2018. – Т. 231. – С. 268–274. DOI: 10.25515/PMI.2018.3.268
3. Михайлов А.Н. Основные представления о переходных зонах и водяных контактах в неоднородных пластах // Георесурсы. Геоэнергетика. Геополитика. – 2012. – № 1 (5). – С. 150–160.
4. Уточнение геолого-гидродинамической модели сложнопостроенной залежи нефти путем комплексного анализа данных /

- Н.Д. Козырев, А.А. Кочнев, А.Г. Менгалиев, И.С. Путилов, С.Н. Кривошеков // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 10. – С. 164–177. DOI: 10.18799/24131830/2020/10/2866
5. Козырев Н.Д., Вишняков А.Ю., Путилов И.С. Оценка влияния параметров неопределенности на прогнозирование показателей разработки // Недропользование. – 2020. – Т. 20. – № 4. – С. 356–368. DOI: 10.15593/2712-8008/2020.4.5
6. Jennings J.B. Capillary pressure techniques application to exploration and development geology // The American Association of Petroleum Geologists Bulletin. – 1987. – V. 71. – P. 1196–1209.
7. Пестов В.В., Москаленко И.В., Александров Б.Л. Определение начальной нефтенасыщенности терригенных коллекторов миоцен-олигоцен Западного Предкавказья на основе капилляриметрических исследований ядра // Нефтяное хозяйство. – 2014. – № 11. – С. 28–30.
8. Капиллярная модель – комплексное геолого-петрофизическое представление залежи при подсчете геологических запасов углеводородов / А.Д. Егорова, Т.Г. Исакова, Т.Ф. Дьяконова, Е.Е. Крестя, Е.И. Бронскова, Н.В. Дорофеев, Е.А. Конорцева, Г.А. Калмыков // Георесурсы. – 2023. – Т. 25. – № 2. – С. 150–160.
9. Белкина В.А., Антипин Я.О., Забоева А.А. Построение трехмерных моделей нефтенасыщенности. Основные проблемы и подходы к их решению // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 9. – С. 223–237. DOI: 10.18799/24131830/2021/9/3371
10. Washburn K.E., Birdwell J.E. A new laboratory approach to shale analysis using NMR relaxometry // The Unconventional Resources Technology Conference. – Denver, Colorado, 2013. – P. 1–8.
11. NMR wettability of carbonate reservoir cores: best practices / B. Sauerer, A. Valori, D. Krinis, W. Abdallah // The SPE Middle East Oil and Gas Show and Conference. – Manama, Bahrain, 2019. – P. 1–17. DOI: 10.2118/194938-MS
12. Determination of NMR T2 cutoff and CT scanning for pore structure evaluation in mixed siliciclastic-carbonate rocks before and after acidification / M. Wang, J. Xie, F. Guo, Y. Zhou, X. Yang, Z. Meng // Energies. – 2020. – V. 13. – Article no. 1338.
13. Чистяков А.А., Швалюк Е.В., Калугин А.А. Применение компьютерной томографии и ЯМР для петротипизации сложнопостроенных терригенных коллекторов // Георесурсы. – 2022. – Т. 24. – № 4. – С. 102–116.
14. Разницын А.В. Интерпретация данных исследований методом ядерного магнитного резонанса в комплексе лабораторных работ по изучению ядра (на примере терригенных отложений Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции) // Недропользование. – 2022. – Т. 22. – № 3. – С. 109–115. DOI: 10.15593/2712-8008/2022.3.2
15. Рогозин А.А., Игнатъева Т.С., Чурков А.В. Комплексирование данных ЯМР-релаксометрии и электрометрических исследований на примере пород-коллекторов месторождений Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции // Экспозиция Нефть Газ. – 2021. – № 6. – С. 62–66. DOI: 10.24412/2076-6785-2021-6-62-66
16. Garcia A.P., Heidari Z., Rostami A. Improved assessment of hydrocarbon saturation in mixed-wet rocks with complex pore structure // Petrophysics. – 2017. – V. 58. – № 5. – P. 454–469.
17. Basics of wettability / V. Abdalla, D.S. Bakli, E. Karnegi, D. Edwards, B. Herold, E. Fordham, A. Graue, T. Nabashi, N. Seleznev, K. Signer, H. Hussein, B. Montaron, M. Ziauddin // Oil and Gas Review. – 2007. – V. 19. – № 2. – P. 54–75.
18. Empirical measures of wettability in porous media and the relationship between them derived from pore-scale modeling / A.B. Dixit, J.S. Buckley, S.R. McDougall, K.S. Sorbie // Transport in porous media. – 2000. – V. 40. – P. 27–54. DOI: 10.1023/A:1006687829177
19. Dual neural network architecture for determining permeability and associated uncertainty / R. Kausik, A. Prado, V.-M. Gkortsas, L. Venkataramanan, H. Datt, Y.B. Johansen // Petrophysics. – 2021. – V. 62. – № 1. – P. 122–134.
20. Кольчев И.Ю. Изучение зональности распределения показателей смачиваемости по данным бокового каротажа для нефтенасыщенных визейских коллекторов Соликамской депрессии // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2017. – Т. 16. – № 4. – С. 331–341. DOI: 10.15593/2224-9923/2017.4.4
21. Study of wettability of reservoirs of oil fields by the method of x-ray tomography core / A. Efimov, Ya. Savitskiy, S. Galkin, E. Soboleva, V. Gurbanov // SOCAR Proceedings. – 2016. – V. 4. – № 4. – P. 55–63. DOI: 10.5510/OGP20160400298
22. Галкин С.В., Кольчев И.Ю., Ракинцев В.А. Возможности определения типа смачиваемости коллекторов по данным каротажа при оптимизации системы заводнения нефтяных пластов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333. – № 1. – С. 34–44. DOI: 10.18799/24131830/2022/1/3225
23. Iskenderov M. Some results of modeling electrical resistivity (on the example of deposits of the South-Absheron aquatorium zone and the northern part of the Baku archipelago) // SOCAR Proceedings. – 2017. – V. 2. – № 2. – P. 4–12. DOI: 10.5510/OGP20170200310
24. Грищенко М.А. Современные подходы к моделированию нефтенасыщенности сложнопостроенных залежей с целью создания гидродинамических моделей // Геология нефти и газа. – 2008. – № 5. – С. 75–80.
25. Закревский К.Е. Геологическое 3D моделирование. – М.: ООО «ИПЦ Маска», 2009. – 376 с.
26. Buckley S.E., Leverett M.C. Mechanism of fluid displacement in sands // Transactions of the American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers. – 1942. – V. 146. – P. 107–116.
27. Niab D., Dinaldson E.C. Petrophysics. – Oxford: Elsevier, 2004. – 926 p.
28. Li Kewen. Theoretical development of the brooks-corey capillary pressure model from fractal modeling of porous media // Symposium on Improved Oil Recovery. – Tulsa, Oklahoma, 2004. – P. 3–9.
29. Akhmetov R.T., Kuleshova L.S., Mukhametshin V.V. Application of the Brooks-Corey model in the conditions of lower cretaceous deposits in terrigenous reservoirs of Western Siberia // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2018. – P. 4–12.
30. Петерсилье В.И., Пороскун В.И., Яценко Г.Г. Методические рекомендации по подсчету геологических запасов нефти и газа объемным методом. – М.: ВНИГНИ, 2003. – 261 с.
31. ОСТ 39-204-86. Нефть. Метод определения остаточной водонасыщенности. – М.: Миннефтепром, 1986. – 12 с.

Поступила: 10.03.2023 г.

Прошла рецензирование: 15.06.2023 г.

Информация об авторах

Потехин Д.В., кандидат технических наук, начальник управления подсчета запасов Тимано-Печорского региона Филиал ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг» «ПермНИПИнефть»; доцент кафедры геологии нефти и газа Пермского национального исследовательского политехнического университета.

Ширяев Е.О., первый заместитель директора – директор по перспективному развитию и маркетингу ООО «ПИТЦ «Геофизика», Россия, 614000, г. Пермь, ул. Петропавловская, 16А.

Галкин С.В., доктор геолого-минералогических наук, профессор, декан горно-нефтяного факультета Пермского национального исследовательского политехнического университета.

UDC 553.98.048-047.58

3D-MODELING TECHNOLOGY OF INITIAL OIL SATURATION IN TRANSITIONAL OIL-WATER ZONE BY COMPLEX OF CAPILLARIMETRY AND ELECTRIC LOGGING METHODS

Denis V. Potekhin^{1,2},
Denis.Potekhin@pnn.lukoil.com

Evgeny O. Shiryaev³,
Shiriaev.EO@pnsh.ru

Sergey V. Galkin²,
doc_galkin@mail.ru

¹ Branch of LLC LUKOIL-Engineering «PermNIPIneft» in Perm,
3a, Permskaya street, Perm, 614015, Russia.

² Perm National Research Polytechnic University,
29, Komsomolsky avenue, Perm, 614990, Russia.

³ LLC PITS Geophysics,
16A, Petropavlovskaya street, Perm, 614000, Russia.

The relevance. 3D distribution of the initial oil saturation in a reservoir volume is one of the key elements of geological and technological modeling, largely determining the quality of subsequent development design solutions. The paper presents an analysis of the current state of the problem of studying an oil-water transition zone and distribution of oil saturation. For terrigenous hydrophilic reservoirs, electric lateral logging quite reliably controls void space fluid saturation in deposit oil part, which suggests the possibility of its integration with widely used capillarimetry methods.

Aim: to evaluate the possibility of reliably determining oil saturation of terrigenous hydrophilic reservoirs by combining the data of electrical lateral logging, filtration-capacitance properties of reservoirs and capillarimetric core studies, to build a 3D model of distribution of the initial oil saturation of reservoirs in oil deposits, taking into account the allocation of the oil-water transition zone.

Object: oil-saturated reservoirs of the Visean oil deposits of the Perm region.

Method: methods of multidimensional mathematical modeling in the development of a methodology for determining the initial oil saturation of reservoirs based on a complex of well logging and capillarimetric studies of the core, construction of 3D distribution of the initial oil saturation of the reservoir, taking into account the parameters of the oil-water transition zone

Results. The authors, based on the developed methodology for the deposit of the reservoir Bb of the Aspinskoe field, built a 3D model of distribution of the initial oil saturation. For the studied reservoir, they carried out the analysis of distribution of zones of free saturation, undersaturation, transition zone and limiting oil saturation. The resulting 3D model can be used in geological and technological modeling of an oil deposit development.

Key words:

Geological modeling, transitional oil-water zone, oil saturation, water saturation, capillarimetry method, well logging, specific electrical resistance, lateral electrical logging.

The study was carried out within the framework of the state task of the Ministry of Science and Higher Education of Russian Federation FSNM-2023-0005 for the implementation of fundamental scientific research.

REFERENCES

1. Zakrevskiy K.E., Popov V.P. The history of development of 3D geology modeling as a method for studying oil and gas reservoirs. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 5, no. 332, pp. 89–100. In Rus.
2. Repina V.A., Galkin V.G., Galkin S.V. The use of integrated accounting of petrophysical characteristics in the adaptation of geological and hydrodynamic models (using the example of the Visean reservoir of the Gondyrevskoye oil field). *Journal of Mining Institute*, 2018, no. 231, pp. 268–274. In Rus. DOI: 10.25515 / PMI.2018.3.268.
3. Mikhaylov A.N. Basic concepts of transition zones and water contacts in heterogeneous formations. *Georesursy. Geoenergetika Geopolitika*, 2021, no. 1 (5), pp. 150–160. In Rus.
4. Kozyrev N.D., Kochnev A.A., Mengaliev A.G., Putilov I.S., Krivoshchekov S.N. Refinement of the geological and hydrodynamic model of a complex oil reservoir by means of a comprehensive data analysis. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 10, no. 331, pp. 164–177. In Rus.
5. Kozyrev N.D., Vishnyakov A.Yu., Putilov I.S. Assessment of the Uncertainty Parameters influence on the development indicators forecasting. *Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering*, 2020, vol. 20, no. 4, pp. 356–368. In Rus.
6. Jennings J.B. Capillary pressure techniques application to exploration and development geology. *The American Association of Petroleum Geologist Bulletin*, 1987, vol. 71, pp. 1196–1209.
7. Pestov V.V., Moskalenko I.V., Aleksandrov B.L. Determination of the initial oil saturation of terrigenous reservoirs of the Miocene-Oligocene of the Western Ciscaucasia on the basis of capillarimetric core studies. *Neftyanoe khozyaystvo*, 2014, no. 11, pp. 28–30. In Rus.
8. Egorova A.D., Isakova T.G., Dyakonova T.F., Kristya E.E., Bronskova E.I., Dorofeev N.V., Konortseva E.A., Kalmykov G.A. Capillary model – complex geological and petrophysical representation of the deposit when calculating geological reserves of hydrocarbons. *Georesursy*, 2023, vol. 25, no. 2, pp. 150–160. In Rus.
9. Belkina V.A. Building three-dimensional models of oil saturation. Main problems and approaches to their solution. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 9, no. 332, pp. 223–237. In Rus.

10. Washburn K.E., Birdwell J.E. A new laboratory approach to shale analysis using NMR relaxometry. *The Unconventional Resources Technology Conference*. Denver, Colorado, the USA, 2013. pp. 1–8.
11. Sauerer B., Valori A., Krinis D., Abdallah W. NMR wettability of carbonate reservoir cores: best practices. *The SPE Middle East Oil and Gas Show and Conference*. Manama, Bahrain, 2019. pp. 1–17. DOI: 10.2118/194938-MS
12. Wang M., Xie J., Guo F., Zhou Y., Yang X., Meng Z. Determination of NMR T2 cutoff and CT scanning for pore structure evaluation in mixed siliciclastic-carbonate rocks before and after acidification. *Energies*, 2020, vol. 13, article no. 1338.
13. Tchistiakov A.A., Shvalyuk E.V., Kalugin A.A. The rock typing of complex clastic formation by means of computed tomography and nuclear magnetic resonance. *Geosursy*, 2022, vol. 24, no. 4, pp. 102–116. In Rus.
14. Raznitsyn A.V. Development of a method for identifying zones to minimize fluid cross flows when modeling reservoirs using the material balance method. *Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering*, 2022, vol. 22, no. 3, pp. 109–115. In Rus.
15. Rogozin A.A., Ignateva T.S., Churkov A.V. Integration of NMR relaxometry data and electrometric studies on the example of reservoir rocks of deposits of the Timan-Pechora oil and gas province. *Exposition Oil Gas*, 2021, no. 6, pp. 62–66. In Rus.
16. Garcia A.P., Heidari Z., Rostami A. Improved assessment of hydrocarbon saturation in mixed-wet rocks with complex pore structure. *Petrophysics*, 2017, vol. 58, no. 5, pp. 454–469.
17. Abdalla V., Bakli D.S., Karmegi E., Edwards D., Herold B., Fordham E., Graue A., Habashi T., Seleznev N., Signer K., Hussein H., Montaron B., Ziauddin M. Basics of wettability. *Oil and Gas Review*, 2007, vol. 19, no. 2, pp. 54–75.
18. Dixit A.B., Buckley J.S., McDougall S.R., Sorbie K.S. Empirical measures of wettability in porous media and the relationship between them derived from pore-scale modeling. *Transport in porous media*, 2000, vol. 40, pp. 27–54. DOI: 10.1023/A:1006687829177
19. Kausik R., Prado A., Gkortsas V.-M., Venkataramanan L., Datir H., Johansen Y.B. Dual neural network architecture for determining permeability and associated uncertainty. *Petrophysics*, 2021, vol. 62, no. 1, pp. 122–134.
20. Kolychev I.Yu. Study of zones of wettability distribution based on lateral logging for oil-bearing Visean reservoirs of the Solikamsk depression. *Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering*, 2017, vol. 16, no. 4, pp. 331–341. In Rus.
21. Efimov A., Savitskiy Ya., Galkin S., Soboleva E., Gurbanov V. Study of wettability of reservoirs of oil fields by the method of x-ray tomography core. *SOCAR Proceedings*, 2016, vol. 4, no. 4, pp. 55–63.
22. Galkin S.V., Kolychev I.Yu., Rakintsev V.A. Building three-dimensional models of oil saturation. Main problems and approaches to their solution. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 1, no. 333, pp. 34–44. In Rus.
23. Iskenderov M. Some results of modeling electrical resistivity (on the example of deposits of the South-Absheron aquatorium zone and the northern part of the Baku archipelago). *SOCAR Proceedings*, 2017, vol. 2, no. 2, pp. 4–12. DOI: 10.5510/OGP20170200310
24. Grishhenko M.A. Modern approaches to modeling the oil saturation of complex deposits in order to create hydrodynamic models. *Geologiya nefi i gaza*, 2008, no. 5, pp. 75–80. In Rus.
25. Zakrevskiy K.E. *Geologicheskoe 3D modelirovanie* [Geological 3D modeling]. Moscow, OOO «IPCz Mask» Publ., 2009. 376 p.
26. Buckley S.E., Leverett M.C. Mechanism of fluid displacement in sands. *Transactions of The American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers*, 1942, vol. 146, pp. 107–116.
27. Niab D., Dinaldson E.C. *Petrophysics*. Oxford, Elsevier, 2004. 926 p.
28. Li Kewen. Theoretical development of the brooks-corey capillary pressure model from fractal modeling of porous media. *Symposium on Improved Oil Recovery*. Tulsa, Oklahoma, 2004. pp. 3–9.
29. Akhmetov R.T., Kuleshova L.S., Mukhametshin V.V. Application of the Brooks–Corey model in the conditions of lower cretaceous deposits in terrigenous reservoirs of Western Siberia. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, pp. 4–12.
30. Petersile V.I., Poroskun V.I., Yatsenko G.G. *Metodicheskie rekomendatsii po podschetu geologicheskikh zapasov nefi i gaza obemnym metodom* [Guidelines for calculating the geological reserves of oil and gas by the volumetric method]. Moscow, VNIGNI Publ., 2003. 261 p.
31. OST 39-204-86. *Metod opredelenia ostatochnoy vodonasishenosti* [Oil. Method for determining residual water saturation]. Moscow, Standartinform Publ., 1986. 12 p.

Received: 10 March 2023.

Reviewed: 15 June 2023.

Information about the authors

Denis V. Potekhin, Cand. Sc., head of the Department, branch of LLC LUKOIL-Engineering «PermNIPIneft» in Perm; associate professor, Perm National Research Polytechnic University.

Evgeny O. Shiryayev, first deputy director – director for prospective development and marketing of LLC PITC Geophysics.

Sergey V. Galkin, Dr. Sc., professor, Dean of Mine Oil Faculty, Perm National Research Polytechnic University.

УДК 550.812.14

ЦИФРОВОЙ КЕРН: ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ НА ДВУХФАЗНУЮ ФИЛЬТРАЦИЮ ФЛЮИДОВ В ГОРНОЙ ПОРОДЕ

Катанов Юрий Евгеньевич¹,
katanov-juri@rambler.ru

Ягафаров Алик Каюмович¹,
jagafarovak@tyuiu.ru

Аристов Артем Игоревич¹,
artizzq@gmail.com

¹ Тюменский индустриальный университет,
Россия, 625039, г. Тюмень, ул. Мельникайте, 70.

Актуальность. Вычислительная гидродинамика является мощным инструментом для изучения геологических процессов. Уравнения течения жидкостей в пористых средах можно решать непосредственно с учетом получаемых трехмерных рентгеновских и компьютерных томографических изображений. Многочисленные исследования геологических особенностей горных пород зависят от теплопередачи в пористых материалах. Эти процессы включают теплопроводность в горном материале, конвекцию между веществом и окружающим газом, электропроводность, вязкую диссипацию жидкостей, кинетику химических реакций, а также межфазную теплопередачу на границе твердое вещество/жидкость. В то время как перенос энергии в пористых средах в условиях локального теплового равновесия хорошо изучен в масштабе закона Дарси, он реже рассматривается в поросетевых моделях. Теплопередача может быть учтена путем создания «тепловой сети» на базе поросетевой модели, представляющей совокупность флюидопроводящих каналов при соответствующем решении уравнения единого энергетического баланса. Также необходим учет конвективного переноса тепловой энергии потоком жидких фаз (нефть, вода), каждая из которых представлена отдельной сетью. Зная распределение температурного поля в текстуре каждого литологического типа породы, можно определить вероятностное смещение фронта вытеснения жидкостей в соответствующем флюидопроводящем пространстве горной породы.

Цель: нейросетевое моделирование влияния температурного поля на фильтрационные характеристики углеводородов в флюидопроводящем пространстве горных пород.

Объекты: полимиктовые песчаники тюменской свиты.

Методы. Цифровая реконструкция текстуры горных пород выполнена с привлечением методов искусственного интеллекта и нейросетей; нейросетевые алгоритмы вероятностного фронта вытеснения двухфазного потока (нефть, вода) разработаны на языке программирования Python; методический подход к исследованию распространения теплового поля в текстуре горных пород и его влияния на двухфазный поток жидкостей разработан с использованием закона Фурье, уравнений Навье–Стокса и критериев подобия углеводородных систем.

Результаты. Разработаны алгоритмы нейросетевого моделирования температурного поля в флюидопроводящем пространстве горной породы (полимиктовый песчаник), а также нейросетевые алгоритмы для оценки смещения фронта двухфазной фильтрации при соответствующем воздействии температурного распределения в текстуре цифрового керна. Изложены базовые математические модели данных алгоритмов. Исходный код алгоритмов написан на языке программирования Python с дополнительным использованием некоммерческих библиотек. Результаты нейросетевого моделирования в высокой степени имеют достоверный уровень, подтверждаемый экспериментами данными, полученными в лаборатории керновых исследований (Тюменский государственный университет, г. Тюмень), лаборатории научно-технического центра рационального недропользования им. В.И. Шпилемана (г. Ханты-Мансийск), лаборатории цифровых исследований в нефтегазовом деле в рамках реализации технологического проекта «Цифровой керн» (Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень).

Ключевые слова:

пустотное пространство, керн, конвекция, кондукция, температура, поросетевая модель, жидкость, слайс, диффузия, модель, поток, фаза.

Введение

Объемная доля пустотного пространства и текстура матрицы горной породы придают пористым средам структурно-вещественные характеристики. Анализируя многочисленные исследования [1–8], можно утверждать, что фазовые взаимодействия между петрофизическими характеристиками горных пород носят локальный характер в соответствии с отдельными литологическими типами, а также их различными композициями (литологические разности).

При изучении физического керна используются различные численные методы для представления его текстуры с закрытыми или открытыми порами и их механическими и гидротермическими характеристиками [9, 10].

С учетом особенностей конвективной теплопередачи при минерогенической интерпретации пористых сред должны использоваться те же принципы, что применимы при моделировании структуры-текстуры любых твердых тел (междисциплинарные аналогии).

Геолого-математическое моделирование на уровне пор означает, что решаются полные уравнения Навье–Стокса для всего потока жидкости и температурного поля внутри пористой текстуры. Данный подход имеет ряд недостатков, в частности дорогостоящий вычислительный процесс из-за сложной геометрии пористых сред, а также низкую точность синтетически сгенерированного керна [11–14].

Для математического описания внутреннего состояния геологической среды используются два существующих температурных поля, относящихся к твердой и жидкой фазам в гетерогенных (неоднородных) моделях.

В гомогенных (однородных) моделях после приложения импульсного возмущения сразу же видна значительная разница в температурах жидкой и твердой фаз.

В результате развития вычислительной гидродинамики (ВГД) и улучшения возможностей воспроизведения геометрии физического керна проводится все больше численных симуляций [15–17].

В ряде научных работ [18–20] математическая модель теплопроводности геологических сред представлена с учетом эффективной проекции смещения температурного фронта на основе фрактальной геометрии.

Для повышения точности моделей пористых континуумов описаны шаги, предпринятые для вычислительного моделирования конвективной теплопередачи в геологических средах. Конвективная теплопередача, возникающая в результате принудительного потока через высокопроводящие пористые микроблоки, была предсказана с помощью ВГД-моделирования.

Идеализированная геометрическая модель пористых сред со сферической текстурой была использована для создания нескольких доменов (отдельных сегментов порового пространства), которые охватывали диапазон пор разного диаметра, типичных для графитовых пен, чтобы сделать первичные прогнозы изменения температурного поля на уровне пор [21–23].

В работах [24–26] предлагается научный подход к численному решению сопряженной тепловой задачи, основанный на алгоритмах конечных элементов. Метод дискретизации Галеркина для решения геолого-математической системы «функция потока – вихрь» дает хорошие результаты только тогда, когда параметры задачи эквивалентны низким числам Рейнольдса [27, 28].

Аналогичная проблема наблюдается при решении уравнения теплопроводности, где можно получить хорошие результаты только при низких числах Пекле (один из критериев подобия углеводородных систем). Это связано с информационной неустойчивостью, которая возникает, когда конвективный член данного уравнения начинает оказывать большее влияние, чем диффузионный член.

Поэтому разработка научного подхода, учитывающего текстурную конфигурацию керна и закономерностей смещения фронта движения жидкостей при воздействии на него температуры, является актуальной задачей. Наиболее оптимальным инструментарием для реализации основ такого научного подхода, при достаточном уровне информативной достоверности, является создание цифровых двойников керна.

Методический подход к исследованию влияния температуры на фильтрационные характеристики жидкостей

Уравнения нестационарной несжимаемой вязкой жидкости, уравнение неразрывности потока и составное уравнение Навье–Стокса связаны с тепловым переносом в рамках следующей системы:

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial x_1} + \frac{\partial v}{\partial x_2} = 0; \\ \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x_1} + v \frac{\partial u}{\partial x_2} = -\frac{\partial P}{\partial x_1} + \frac{1}{\text{Re}} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial x_2^2} \right); \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x_1} + v \frac{\partial v}{\partial x_2} = -\frac{\partial P}{\partial x_2} + \frac{1}{\text{Re}} \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial x_2^2} \right); \\ \frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x_1} + v \frac{\partial T}{\partial x_2} = \frac{1}{\text{Pr}} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial x_2^2} \right), \end{cases} \quad (1)$$

где u , v – соответственно, компоненты скоростей потока вдоль направлений x_1 , x_2 , P , T – соответственно, давление и температура флюида; Re – число Рейнольдса; Pr – число Прандтля.

Геологическим средам с разными петрофизическими особенностями характерны индивидуальные механизмы взаимодействия структурно-вещественных характеристик, приводящих ко множеству моделей теплопроводности (или диффузии). Согласно теории теплопроводности, в газовом поле она происходит за счет столкновений молекул, а в жидкостях – за счет колебаний каждой молекулы внутри «тепловой клетки», образованной ее ближайшими «соседями».

Закон теплопроводности, известный как закон Фурье, гласит, что в сплошной среде кондуктивный тепловой поток q обратно пропорционален градиенту температуры ΔT :

$$q = -k \nabla T, \quad (2)$$

где k – теплопроводность (единица СИ: Вт/(м·К)); когда данная характеристика имеет положительное значение, тепло перемещается от «горячих участков» к более холодным; $\nabla = \frac{\partial}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial}{\partial z} \vec{k}$ – оператор

Гамильтона; $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ – орты (единичные вектора), задающие начальные направления осей x , y , z , соответственно.

Для сопряженной теплопроводности на уровне пор физического керна рассматривается пористая область, состоящая из двух подобластей: твердое вещество керна (зерна и цементирующее вещество) S и пустотное пространство F .

Допуская, что область пустотного пространства керна заполнена флюидом, уравнение энергии для несжимаемой однофазной жидкости будет следующим:

$$\frac{\partial(\rho_{\text{ж}} T_{\text{ж}})}{\partial t} + \nabla(\rho_{\text{ж}} T_{\text{ж}} v_{\text{ж}}) - \nabla(\lambda_{\text{ж}} \nabla T_{\text{ж}}) = 0, \quad (3)$$

где $T_{\text{ж}}$ – температура жидкости, К; $\lambda_{\text{ж}}$, $\rho_{\text{ж}}$, $v_{\text{ж}}$ – соответственно, теплопроводность, удельная теплоемкость и скорость движения жидкости; $\Delta T_{\text{ж}}$ – температурный градиент жидкости; ρ – плотность жидкости, кг/м³; $\frac{\partial(\rho_{\text{ж}} T_{\text{ж}})}{\partial t}$ – плотность изменения потока жидкости в пустотном пространстве керна по времени t .

Тогда уравнение энергии для твердого вещества керна можно представить следующим образом:

$$\frac{\partial(\rho_{\text{тв}} c_{\text{тв}} T_{\text{тв}})}{\partial t} - \nabla(\lambda_{\text{тв}} \nabla T_{\text{тв}}) = 0, \quad (4)$$

где $c_{\text{тв}}$, $\lambda_{\text{тв}}$, $\rho_{\text{тв}}$, $\Delta T_{\text{тв}}$ – соответственно, удельная теплоемкость, эффективная теплопроводность, плотность и температурный градиент твердого вещества керна;

$\frac{\partial(\rho_{\text{тв}} c_{\text{тв}} T_{\text{тв}})}{\partial t}$ – плотность изменения теплопроводности в твердом веществе керна по времени t .

Поскольку между твердым веществом и заполненными флюидом пустотами нет массопереноса, любое движение жидкости внутри пачек зерен можно не учитывать.

Если же в твердом веществе керна обнаружены нанопоры, их следует учитывать в виде отдельных пространственных кластеров либо считать настолько малыми, что фронт потока жидкостей не изменит своих границ при движении в пустотном пространстве.

В базовом варианте геолого-математической модели двухфазной фильтрации (нефть, вода) не будет учитываться влияние шероховатости поверхности зерен на поток и теплоперенос.

В качестве условия отсутствия течения и скольжения на границе раздела геологических сред можно задать значение скорости потока $v_{\text{fluid}}=0$, соответствующее квазитрехмерному ограничению системы «керна–флюид».

С точки зрения теории равновесного состояния, подходящими условиями непрерывности изменения температурного поля и фильтрационных потоков, проводящих тепловую энергию на границе раздела между твердым веществом и пустотным пространством керна, являются следующие:

$$\begin{cases} T_{\text{тв}} = T_{\text{ж}}; \\ \lambda_{\text{тв}} \nabla T_{\text{тв}} n = -\lambda_{\text{ж}} \nabla T_{\text{ж}} n, \end{cases} \quad (5)$$

где n – вектор нормализации.

Относительные инерционные и вязкие силы системы «тепловой поток – жидкость» можно представить на базе числа Рейнольдса:

$$\text{Re} = \frac{\rho v_{\text{хар}} l_{\text{хар}}}{\mu}, \quad (6)$$

где $l_{\text{хар}}$ – характерный масштаб участка керна для соответствующей скорости течения жидкостей $v_{\text{хар}}$; μ – динамическая вязкость жидкостей.

В данном исследовании учитывается ламинарное течение (низкие и умеренные числа Рейнольдса).

Отношение скорости кондуктивного переноса тепла (теплопередачи) к скорости адвективного переноса тепла известно, как число Пекле Pe :

$$\text{Pe} = \frac{\rho c_{\text{р,ж}} v_{\text{хар}} l_{\text{хар}}}{\lambda_{\text{ж}}} = \text{RePr}, \quad (7)$$

где Pr – число Прандтля; Re – число Рейнольдса; $\lambda_{\text{ж}}$ – теплопроводность жидкости; $v_{\text{хар}}$ – характерная скорость жидкости; $l_{\text{хар}}$ – характеристическая длина участка течения жидкости; $c_{\text{р,ж}}$ – удельная теплоемкость жидкости; ρ – плотность жидкости, кг/м^3 .

Физический смысл числа Прандтля Pr с учетом (6) сводится к соотношению динамической вязкости, удельной теплоемкости и теплопроводности жидкости:

$$\text{Pr} = \mu c_{\text{р,ж}} \lambda_{\text{ж}}^{-1}. \quad (8)$$

Теплообмен между поверхностью керна с температурой T_{w} и жидкостью с температурой T_{∞} обычно описывается температурой Θ :

$$\Theta \equiv \frac{T - T_{\infty}}{T_{\text{w}} - T_{\infty}}, \quad (9)$$

где T_{∞} – температура входящего флюида; T_{w} – температура твердой поверхности керна; T – текущая температура флюида.

Учитывая (6)–(9) в уравнениях баланса (1), получаем основные уравнения для компьютерного моделирования гидродинамики в пространстве цифрового керна:

$$\begin{cases} \frac{\partial v_j}{\partial x_j} = 0; \\ \frac{\partial v_i}{\partial t} + v_j \frac{\partial v_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{1}{\text{Re}} \frac{\partial^2 v_i}{\partial x_j \partial x_j}; \\ \frac{\partial \Theta}{\partial t} + v_j \frac{\partial \Theta}{\partial x_j} = \frac{1}{\text{RePr}} \frac{\partial^2 \Theta}{\partial x_j \partial x_j}, \end{cases} \quad (10)$$

где v_j – компоненты скорости потока при смещениях

j ; $\frac{\partial v_j}{\partial x_j}$ – производная компонент потока при смеще-

ниях j по направлению x_j ; $\frac{\partial v_i}{\partial t}$ – производная компо-

нент потока при смещениях i по времени t ; $\frac{\partial v_i}{\partial x_j}$ –

производная компонент потока при смещениях i по направлению x_j ; $\frac{\partial^2 v_i}{\partial x_j \partial x_j}$ – вторая производная ско-

рости потока при смещениях i по направлению x_j ; ρ – плотность потока, кг/м^3 ; $\frac{\partial p}{\partial x_i}$ – производная давления

потока по направлению x_i ; $\frac{\partial \Theta}{\partial t}$ – производная темпе-

ратуры системы «твердое вещество керна – пустотное пространство» по времени t ; $\frac{\partial \Theta}{\partial x_j}$ – производная

температуры системы «твердое вещество керна – пустотное пространство» по направлению x_j ; $\frac{\partial^2 \Theta}{\partial x_j \partial x_j}$ –

вторая производная температуры системы «твердое вещество керна – пустотное пространство» по направлению x_j ; Re – число Рейнольдса; Pr – число Прандтля.

Функции распределения фильтрационного ψ и вихревого ζ потоков, определяемые соответствующе-

щими скоростями течения, для несжимаемых двухфазных жидкостей можно представить в следующем виде:

$$\zeta = \frac{\partial v}{\partial x_1} - \frac{\partial u}{\partial x_2}, \quad (11)$$

где $\frac{\partial v}{\partial x_1}$ – производная второго компонента скорости потока (вода) по направлению x_1 ; $\frac{\partial u}{\partial x_2}$ – производная первого компонента скорости потока (нефть) по направлению x_2 .

Посредством локальной интерполяции для каждой пары двух пространственных точек в поле двухфазного потока и в дальнейшем, при переходе к глобальной интерполяции единых линий тока, получаем совокупность функций потока, определяющих суммарный объемный расход жидкостей. Компоненты скорости рассчитываются с помощью частных производных скалярной функции потока (полуэмпирическая форма):

$$\begin{cases} u = \frac{\partial \psi}{\partial x_2}; \\ v = -\frac{\partial \psi}{\partial x_1}, \end{cases} \quad (12)$$

где $\frac{\partial \psi}{\partial x_2}$ – производная функции потока по направлению x_2 ; $\frac{\partial \psi}{\partial x_1}$ – производная функции потока по направлению x_1 .

Используя (11), (12), уравнения Навье–Стокса для несжимаемых жидкостей (10) приобретают следующий модифицированный вид:

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 \psi}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial x_2^2} = -\zeta; \\ \frac{\partial \zeta}{\partial t} + v_j \frac{\partial \zeta}{\partial x_j} = \frac{1}{\text{Re}} \frac{\partial^2 \zeta}{\partial x_j \partial x_j}; \\ \frac{\partial \Theta}{\partial t} + v_j \frac{\partial \Theta}{\partial x_j} = \frac{1}{\text{Re Pr}} \frac{\partial^2 \Theta}{\partial x_j \partial x_j}, \end{cases} \quad (13)$$

где $\frac{\partial^2 \psi}{\partial x_1^2}$ – производная функции фильтрационного потока второго порядка по направлению x_1 ; $\frac{\partial^2 \psi}{\partial x_2^2}$ – производная функции фильтрационного потока второго порядка по направлению x_2 ; $\frac{\partial \zeta}{\partial t}$ – производная функции вихревого потока по времени t ; $\frac{\partial \zeta}{\partial x_j}$ – производная функции вихревого потока по направлению x_j ; $\frac{\partial^2 \zeta}{\partial x_j \partial x_j}$ – производная функции вихревого потока

второго порядка по направлению x_j ; $\frac{\partial \Theta}{\partial t}$ – производная температуры системы «твердое вещество керна – пустотное пространство» по времени t ; $\frac{\partial \Theta}{\partial x_j}$ – производная температуры системы «твердое вещество керна – пустотное пространство» по направлению x_j ; $\frac{\partial^2 \Theta}{\partial x_j \partial x_j}$ – производная температуры второго порядка системы «твердое вещество керна – пустотное пространство» по направлению x_j .

Тогда коэффициент поверхностного трения потока жидкостей можно определить следующим образом:

$$c_f = \frac{2}{\text{Re}} \zeta_w, \quad (14)$$

где Re – число Рейнольдса; ζ_w – вихревой поток на поверхности твердого вещества керна.

Для компьютерной реализации математического аппарата (1)–(14) были разработаны нейросетевые алгоритмы с использованием языка программирования Python, с привлечением некоммерческих библиотек для решения уравнений методом конечных элементов (PoreSpy, SfePy).

В качестве входных данных для алгоритмов используются графические образы шлифов горных пород, томографические образы и рентгенограммы образцов керна в форматах JPEG, BMP, TIFF, PNG.

В качестве выходных данных формируются RAW-массивы графических образов насыщенного флюидами пространства цифрового керна с соответствующей кодификацией значений температуры и скорости фильтрации в каждой пространственной точке.

Результаты и обсуждения

Исходные данные графических образов керна материала горных пород, на примере текстуры полимиктовых песчаников, были подвергнуты процедуре бинаризации: флюидопроводящее пространство и минерально-компонентный состав (зерна породы и цементирующее вещество) организованы в одном направлении для формирования гиперкуба цифрового керна (рис. 1).

Последовательность дальнейшего цифрового преобразования керна данных можно описать следующим образом (рис. 2, цифровые двойники 1–7):

- на основании первичной геолого-геофизической информации и данных томографии формируется поле центроидов областей конфузоров/диффузоров (то есть резких сужений/расширений флюидопроводящих каналов) текстуры керна (1) посредством нейросетевого моделирования;
- на базе языка программирования Python с учетом (1) создаются геологические цифровые двойники горных пород для сегментированной текстуры керна (2), симуляции изменения флюидонасыщенности/капиллярного давления (3), распределения температурного поля (4) и двухфазной фильтрации (в вертикальном направлении) (5) в пространстве текстурного каркаса цифрового керна (6).

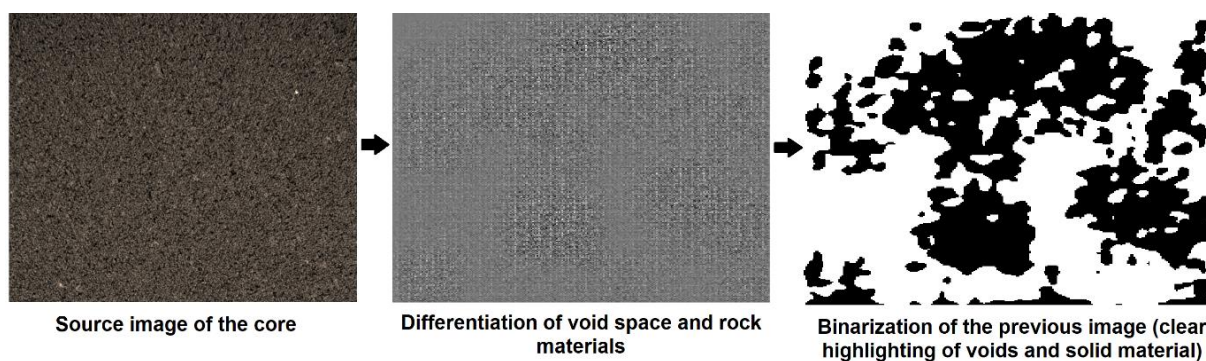


Рис. 1. Процедура начального цифрового преобразования керновых данных (Source image of the core – исходное изображение керна; Differentiation of void space and rock materials – дифференциация пустотного пространства и материалов горных пород; Binarization of the previous image (clear highlighting of voids and solid materials) – бинаризация предыдущего изображения (четкое освещение пустот и твердых материалов))

Fig. 1. Procedure of initial digital conversion of core data

Также представлена вынужденная латеральная миграция (преимущественно в горизонтальном направлении) цифрового флюида (7) в пространстве цифрового керна (6).

Стоит отметить, что симуляции флюидонасыщенности/капиллярного давления (3) рассматриваются как функции $f(x_1, x_2)$, зависящие от двух переменных (x_1 – флюидонасыщенность, x_2 – капиллярное давление), данные по которым были получены посредством лабораторных исследований.

В качестве начальных условий для модифицированных уравнений Навье–Стокса при моделировании температурного поля в флюидопроводящем пространстве горной породы установлены следующие значения:

- температура минерально-компонентного состава породы 335 К;
- температура пустотного пространства, в котором сосредоточены флюиды, 300 К;

- температура источников теплового поля 340 К;
- число Рейнольдса 100;
- кинематическая вязкость $1,48 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$;
- коэффициент термодиффузии $22,07 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$;
- теплопроводность 10 Вт/(м·К);
- фактор верхней релаксации 1.

Для прогнозирования температуры в пустотном пространстве горной породы, с учетом расположения в нем источников тепла, было получено множество однокадровых графических изображений цифрового керна на 256 на 256 пространственных точек (вокселей – пространственных пикселей). В качестве источников тепла использовались сосредоточения центроидов областей конфузоров/диффузоров керна, индивидуальный размер которых определяется их текстурной конфигурацией (технология извлечения семантической информации из графических образов).

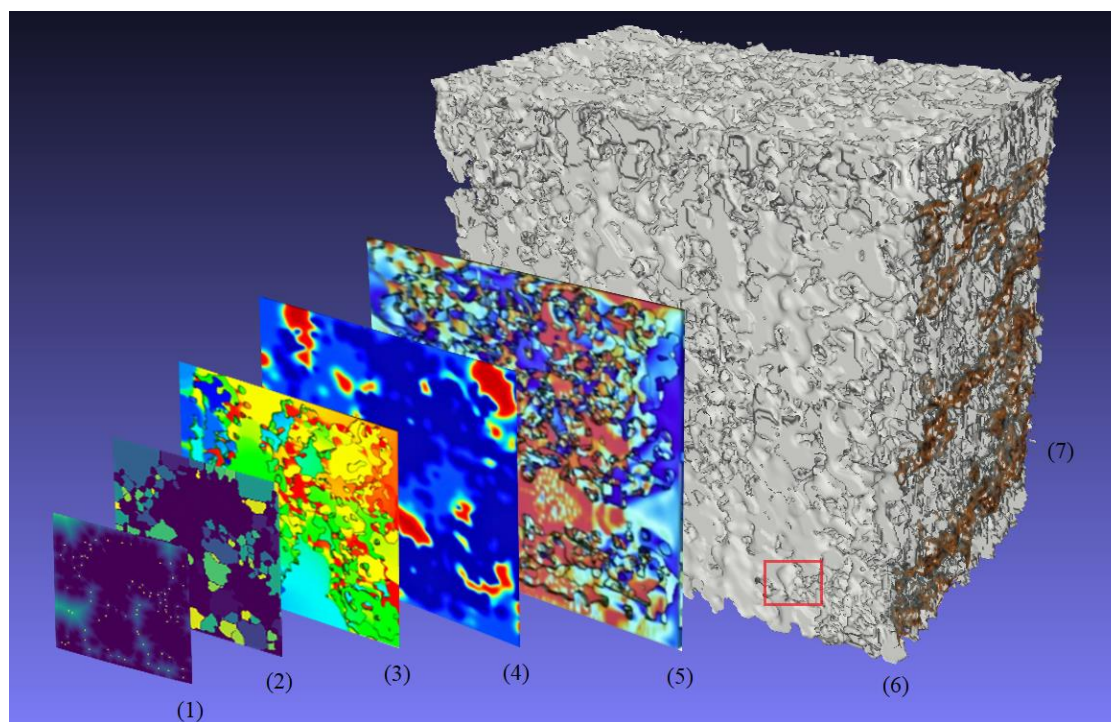


Рис. 2. Цифровая трансформация керновых данных

Fig. 2. Digital transformation of core data

При нейросетевом моделировании распространения температурного поля движущимся флюидом в пустотном пространстве горной породы, с учетом закона Фурье, цифровой двойник двухфазного потока был реконструирован таким образом, чтобы тепловой поток мог смещаться от передней до задних граней гиперкуба цифрового керна. При этом были заданы следующие начальные условия:

- температура входящего потока 330 К;
- температура выходящего потока 290 К;
- теплопроводность потока 0,024 Вт/м·К;
- теплоемкость потока 75,28 Дж/(моль·К);
- ацентрический фактор 11,5 Дж/(моль·К);
- точка «кипения» 373,15 К;
- молекулярная масса 0,018 кг/моль;
- критическая температура 647,15 К;
- динамическая вязкость 75,28 Па·с;
- минерализация 0 г/кг;
- критическое давление 3771000 Па.

Принцип взаимодействия текстурных элементов цифрового керна в поле изменения температур представлен на рис. 3.

На рис. 4 представлена динамика вероятностного смещения температурного поля в текстуре полимиктового песчаника для выделенной «красной области» (рис. 2) отдельного участка цифрового керна с соответствующей кодификацией каждого вокселя мине-

рально-компонентного вещества и флюидопроводящего пространства до последней итерации нейросетевой симуляции.

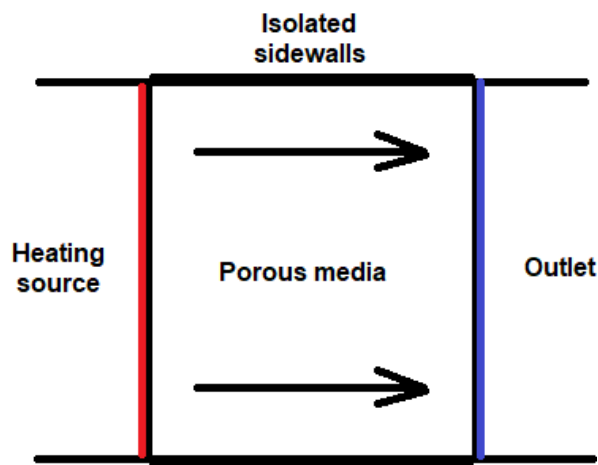


Рис. 3. Схема функционирования текстурных элементов цифрового керна для нейросетевой модели распространения температурного поля (Isolated sidewalls – изолированные боковые стенки; Heating source – источник тепла; Porous media – пористая среда; Outlet – выход)

Fig. 3. Scheme of functioning of digital core texture elements for the neural network model of temperature field propagation

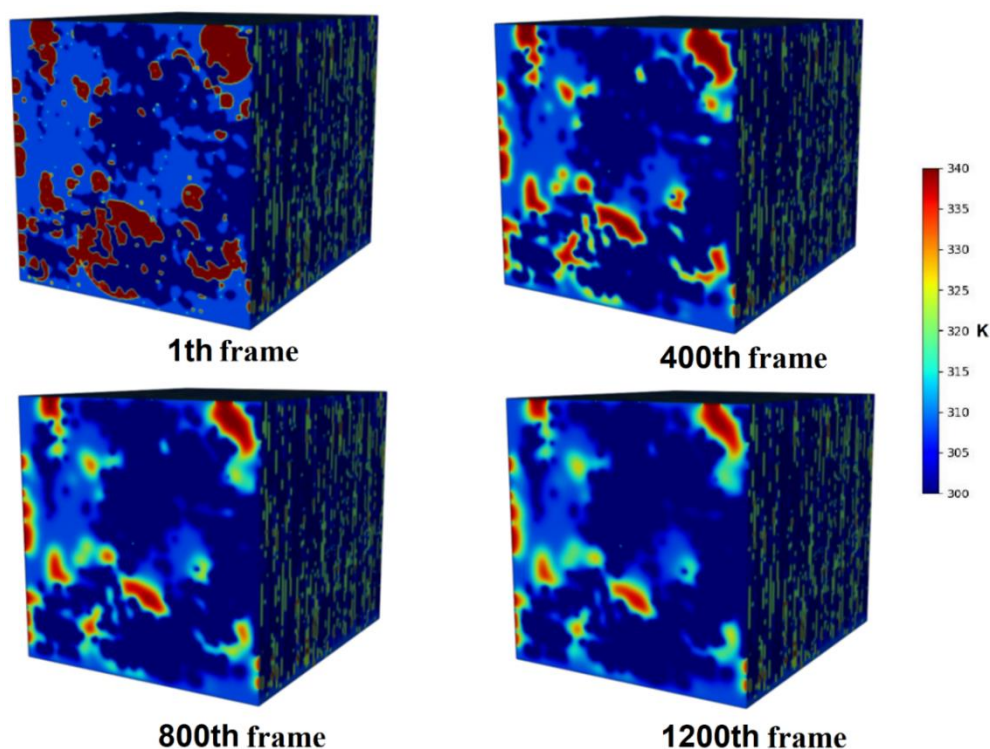


Рис. 4. Изменение температурного поля в участке цифрового керна: 1, 400, 800 и 1200 кадры (frames) нейросетевой симуляции

Fig. 4. Variation of the temperature field in the digital core section: 1, 400, 800 and 1200 frames of the neural network simulation

Результаты итоговой нейросетевой симуляции системы «цифровой керн – цифровой флюид – цифро-

вое температурное поле» представлены гиперкубом на рис. 5.

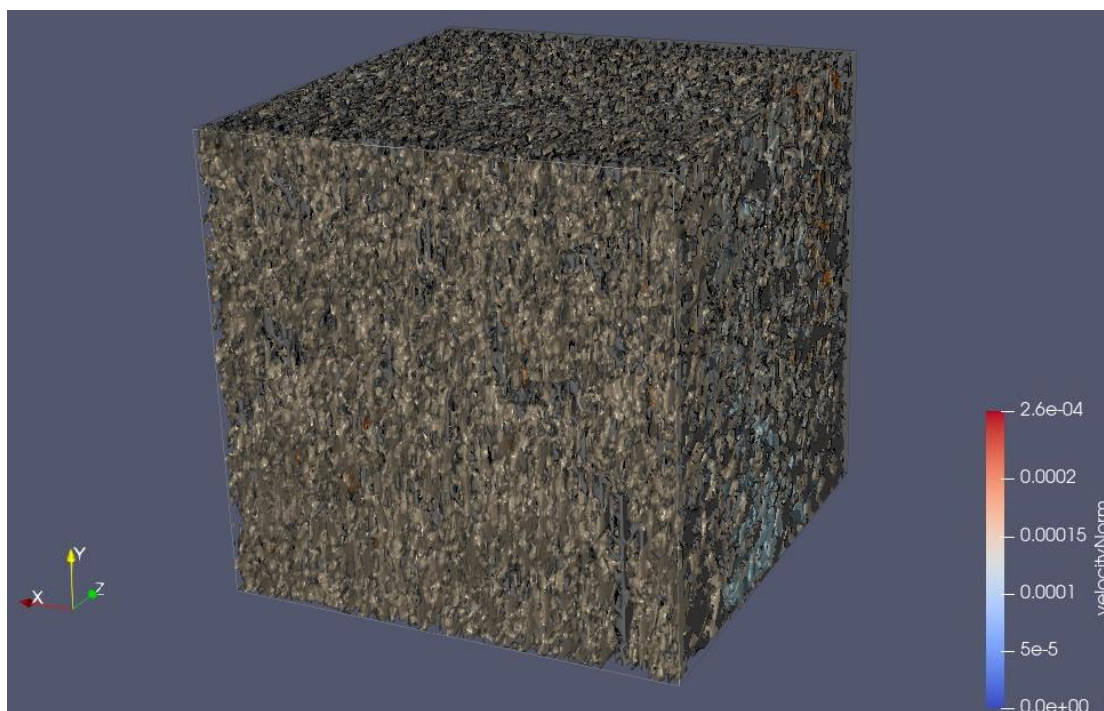


Рис. 5. Распределение двухфазного потока (нефть, вода) с учетом изменения температурного поля в системе «цифровой керн – цифровой флюид»

Fig. 5. Distribution of two-phase flow (oil, water) taking into account temperature field changes in the «digital core – digital fluid» system

Для моделирования процесса дренирования и капиллярной пропитки были добавлены два буферных слоя на уровне входа и выхода в образце цифрового керна, чтобы обеспечить закачку и вытеснения флюидов.

Процесс дренирования двухфазного потока сквозь текстуру полимиктового песчаника, полностью насыщенного нефтью (смачиваемая фаза), начался со входного слоя цифрового керна, изначально насыщенного водой (несмачивающая фаза) с приложением равномерной силы в направлении оси x .

Учитывая высокое капиллярное давление, отдельные конфузоры/диффузоры сегментированной текстуры песчаника не были заполнены несмачивающей фазой.

Мениск флюидов с низкой начальной кривизной вводится в физическую область керна и движется в направлении x , y , z с низкой скоростью до достижения равновесного положения в сегментированной текстуре.

Процесс дренирования происходит при постепенном увеличении межфазной кривизны $\Delta\kappa$ мениска на каждом шаге симуляции с соответствующим расчетом капиллярного давления P_c в каждой пространственной точке фронта движения потока с межфазным натяжением σ : $P_c = \frac{\sigma}{\Delta\kappa}$.

Маскирование нейросетевой симуляции осуществляется на каждом временном шаге с некоторым гидродинамическим перекрытием p и может быть выражено следующим аналитическим выражением:

$$\varphi(x, t) + p \leq \psi,$$

где перекрытие p измеряется для каждого шага гидродинамической сетки Δx ; $\varphi(x, t)$ – функция «level-set», определяемая в каждой точке гидродинамической сетки в области цифрового керна, задаваемая расстоянием до границы раздела фаз в общем потоке при соприкосновении с твердым веществом (зерна и цементующее вещество).

Иными словами, расположение пор (первичных и вторичных) и твердого вещества керна определяется функцией ψ . Значения $\psi > 0$ соответствуют флюидопроводящему пространству, а $\psi < 0$ – твердой матрице породы и, следовательно, величина $\psi = 0$ соответствует входам в поры.

Аналогично местоположение несмачивающей/смачивающей жидкостей определяется функцией φ , значения которой $\varphi < 0$ соответствуют смачивающей жидкости, а $\varphi > 0$ представляют смачивающую жидкость при ее сосредоточении в твердом веществе.

Контактный угол поверхности твердого вещества цифрового керна был определен как $\psi_s = 0,4$.

Несмачивающая и смачивающая фазы в состоянии условной неподвижности идентифицируются циклично реконструируемыми «масками» подсетей, которые необходимы для обновления нормальных и криволинейных скоростей потока с помощью функций Хевисайда $H(\psi)$. Связность несмачивающей и смачивающей фаз проверяется в каждой точке текстуры цифрового керна при повторной инициализации «level-set». $H(-\psi_w)$ принимает значение 1, когда ψ_w отрицательно, и 0, когда ψ_w положительно.

Таким образом, обновленные нормальная и криволинейная скорости потока могут быть выражены в следующем виде:

$$\begin{cases} a = H(-\psi_o)H(-\psi_w) \times \\ \times (H(-\psi)\kappa_0 - S(\psi)H(\psi)\cos\beta \nabla\psi); \\ b = H(-\psi_o)H(-\psi_w)H(-\psi)\kappa_\phi, \end{cases}$$

где a – скорость перемещения границы раздела фаз в нормальном направлении, рассматриваемая величиной капиллярного давления; b – скорость воздействия сил межфазного натяжения; $H(\psi)$ – функция Хевисайда; ψ_o – функция «level-set» для фазы нефти; ψ_w – функция «level-set» для фазы воды; β – угол между нормальными поверхностями ϕ и ψ ; κ_0 – нормальная скорость потока на границе раздела фаз внутри порового пространства; $S(\psi)$ – сигма-функция, обеспечивающая распространение контактного угла флюидов и твердой поверхности цифрового керна в сторону от внешней границы воздействия; κ_ϕ – нулевая кривизна для функции «level-set» относительно несмачивающей/смачивающей фаз.

Для аппроксимации пространственных производных используются принципиально неосциллирующие схемы третьего порядка, для которых градиенты нормальных и конвективных членов исследуются с центрированной конечной разностью второго порядка.

Производная по времени аппроксимируется с помощью точной схемы интегрирования Рунге–Кутты третьего порядка с уменьшением полной вариации, а шаг по времени ограничивается условиями Куранта–Фридрихса–Льюиса.

Заключение

Выполненные исследования по нейросетевому моделированию системы «цифровой керн – цифровой флюид – температурное поле» позволяют сформулировать следующие положения:

- разработаны цифровые двойники системы «керн – флюид – температурное поле» для процессов теплопереноса и двухфазной фильтрации, способ-

ствующие решению обратных задач микроструктурных процессов в пористых средах;

- интерпретация результатов моделирования дает возможность определить вероятностные фронты движения углеводородов (нефть, вода) в флюидо-проводящем пространстве горных пород для соответствующих кондукционных направлений в твердом веществе цифрового керна;
- полученные результаты нейросетевого моделирования позволяют разработать алгоритмы взаимосвязи температурных явлений и структурно-текстурных деформаций в горной породе, вызванных выпадением/растворением осадков, тепловым расширением, набуханием цементирующего вещества (глины) при взаимодействии с жидкостями (дилатация, дисторсия).

Разработанные алгоритмы являются высокопроизводительными и могут быть скомпилированы для запуска в macOS, Microsoft Windows и любой Linux-подобной операционной системе (Ubuntu, Linux Mint и т. д.).

Ошибка вычисления системы уравнений для нейросетевого моделирования температурного поля в твердом веществе породы составила по абсолютной величине $9,148375e-09$ ед. Текущая точность расчета 92 %.

Текущая точность вычисления влияния температурного поля на движущийся двухфазный поток (втекающий и вытекающий через текстурные грани гиперкуба цифрового керна) в пустотном пространстве горной породы составляет 93 %.

Согласно результатам нейросетевого моделирования (рис. 5), скорость фильтрации двухфазного потока в цифровом керне размером 30×30 мм изменяется в диапазоне $(0,0e+00; 2,6e-04)$ м/с.

Статья подготовлена в рамках технологического проекта «Цифровой керн», реализуемого в Западно-Сибирском межрегиональном научно-образовательном центре мирового уровня.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Vu J. Modelling of convective heat transfer in porous media. Thesis of Master of Engineering Science degree in Mechanical and Materials Engineering. – London, 2017. – 84 p.
2. Direct numerical simulation of pore-scale trapping events during capillary-dominated two-phase flow in porous media / M. Shams, K. Singh, B. Bijeljic, M.J. Blunt // Transport in Porous Media. – 2021. – № 2 (138). – P. 443–458.
3. A (dual) network model for heat transfer in porous media / T. Koch, K. Weishaupt, J. Müller, B. Weigand, R. Helmig // Transport in Porous Media. – 2021. – № 1 (140). – P. 107–141.
4. Cimrman R. SfePy-write your own FE application // Proc. of the 6th EUR. Conf. on Python in Science. – West Bohemia, 2014. – P. 65–69.
5. Исследование влияния капиллярных явлений при фильтрации двухфазных несмешивающихся жидкостей в пористых средах / Ю.Е. Катанов, А.К. Ягафаров, И.И. Клещенко, М.Е. Савина, Г.А. Шлеин // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2020. – № 1. – С. 19–29.
6. Katanov Y.E., Vaganov Y.V., Listak M.V. Geological and mathematical description of the rocks strain during behaviour of the producing solid mass in compression (Tension) // Journal of Mines, Metals and Fuels. – 2020. – № 9 (69). – P. 285–292.
7. Comprehensive approach for porous materials analysis using a dedicated preprocessing tool for mass and heat transfer modeling / P. Madejski, P. Krakowska, M. Habrat, E. Puskarczyk, M. Jędry-
8. chowski // Journal of Thermal Science. – 2018. – № 5 (27). – P. 479–486.
9. Quintard M., Kaviany M., Whitaker S. Two-medium treatment of heat transfer in porous media: numerical results for effective properties // Advances in water resources. – 1997. – № 2 (20). – P. 77–94.
10. Liu Z., Wu H. Pore-scale study on flow and heat transfer in 3D reconstructed porous media using micro-tomography images // Applied Thermal Engineering. – 2016. – № 100. – P. 602–610.
11. Heat conduction in porous media characterized by fractal geometry / Z. Deng, X. Liu, Y. Huang, C. Zhang, Y. Chen // Energies. – 2017. – № 8 (10). – P. 1230–1243.
12. Ahmed B., Javed T. A study of full Navier-Stokes equations of peristaltic flow in a porous-saturated tube under the inducement of magnetic field: finite element analysis // Chaos, Solitons & Fractals. – 2019. – № 125. – P. 79–87.
13. Numerical simulation of fluid flow and heat transfer of supercritical CO₂ in micro-porous media / H.S. Choi, H.C. Park, C. Huh, S.G. Kang // Energy Procedia. – 2011. – № 4. – P. 3786–3793.
14. Abou-Zeid M.Y., Shaaban A.A., Alnour M.Y. Numerical treatment and global error estimation of natural convective effects on gliding motion of bacteria on a power-law nanoslime through a non-Darcy porous medium // Journal of Porous Media. – 2015. – V. 65. – № 12. – P. 647–655.
15. Determining fluid flow zones in a geothermal reservoir from thermal conductivity and temperature / S. Haffen, Y. Géraud, M. Diraision, C. Dezayes // Geothermics. – 2013. – № 46. – P. 32–41.

15. The effect of heat transfer and polymer concentration on non-Newtonian fluid from pore-scale simulation of rock X-ray micro-CT / M. Tembely, A.M. AlSumaiti, M.S. Jouini, K. Rahimov // *Polymers*. – 2017. – № 9 (10). – P. 509–527.
16. Liu S., Masliyah J.H. Dispersion in porous media // *Handbook of porous media*. – Liverpool: CRC Press, 2005. – P. 99–160.
17. Liu H., Zhao X. Thermal conductivity analysis of high porosity structures with open and closed pores // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2022. – № 183. – P. 122089.
18. Nazari M., Mahmoudi Y., Hooman K. Introduction to fluid flow and heat transfer in porous media // *Convective heat transfer in porous media*. – Belfast: CRC Press, 2019. – P. 3–18.
19. Dynamic fluid connectivity during steady-state multiphase flow in a sandstone / C.A. Reynolds, H. Menke, M. Andrew, M.J. Blunt, S. Krevor // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. – 2017. – № 31 (114). – P. 8187–8192.
20. Dullien F.A. Porous media: fluid transport and pore structure. – Ann Arbor: Academic press, 1979. – 416 p.
21. Leary P., Malin P., Niemi R. Fluid flow and heat transport computation for power-law scaling poro-perm media // *Geofluids*. – 2017. – № 3. – P. 1–12.
22. Maes J., Menke H.P. GeoChemFoam: direct modelling of flow and heat transfer in micro-CT images of porous media // *Heat and Mass Transfer*. – 2022. – № 58. – P. 1–11.
23. Adivarahan P., Kunii D., Smith J.M. Heat transfer in porous rocks through which single-phase fluids are flowing // *Society of Petroleum Engineers Journal*. – 1962. – № 2 (03). – P. 290–296.
24. Numerical simulation on convective heat transfer characteristics in porous media based on the digital rock technology / J. Liu, P. Yu, Y. Li, C. Wan, D. Du // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2022. – № 196. – P. 123323.
25. Afshari S., Hejazi S.H., Kantzas A. Pore-scale modeling of coupled thermal and solutal dispersion in double diffusive-advective flows through porous media // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2020. – № 147. – P. 118730.
26. Sosnowski P. Numerical investigation of evaporation and condensation of thin films in conjugated heat transfer systems. – Trieste, Italy: School of Doctorate in Environmental and Industrial Fluid Mechanics XXV Cycle, 2013. – 129 p.
27. Markov S.I., Shurina E.P., Itkina N.B. A multi-scale discontinuous Galerkin method for mathematical modeling of heat conduction processes with phase transitions in heterogeneous media // *Journal of Physics: Conference Series*. IOP Publishing. – 2019. – V. 1333. – № 3. – P. 032052.
28. Carnevale L., Anjos G., Mangiacavacchi N. Stream function-vorticity formulation applied in the conjugated heat problem using the fem with unstructured mesh // *Group of Environmental Studies for Water Reservoirs – GESAR*. – 2018. – № 121. – P. 20940.

Поступила: 27.02.2023 г.

Прошла рецензирование: 03.03.2023 г.

Информация об авторах

Катанов Ю.Е., кандидат геолого-минералогических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, лаборатория капитального ремонта скважин и интенсификации притока, лаборатория цифровых исследований в нефтегазовой отрасли Тюменского индустриального университета.

Ягафаров А.К., доктор геолого-минералогических наук, заслуженный геолог РФ, академик РАЕН им. В.И. Вернадского, почётный нефтяник Тюменской области, профессор, Тюменский индустриальный университет.

Аристов А.И., лаборант-исследователь лаборатории цифровых исследований в нефтегазовой отрасли Тюменского индустриального университета.

DIGITAL CORE: TEMPERATURE FIELD INFLUENCE ON TWO-PHASE FILTRATION OF FLUIDS IN ROCKS

Yuri E. Katanov¹,
katanov-juri@rambler.ru

AliK K. Yagafarov¹,
yagafarovak@tyuiu.ru

Artem I. Aristov¹,
artizzq@gmail.com

¹ Industrial University of Tyumen,
70, Melnikaite street, Tyumen, 625039, Russia.

Relevance. Computational fluid dynamics is a powerful tool for studying geological processes. Fluid flow equations in porous media can be solved directly with the resulting three-dimensional X-ray and computer tomographic images. Numerous studies of the geological features of rocks depend on heat transfer in porous materials. These processes include heat conduction in the rock material, convection between matter and surrounding gas, electrical conductivity, viscous dissipation of fluids, kinetics of chemical reactions, and interfacial heat transfer at the solid/liquid interface. While energy transfer in porous media under conditions of local thermal equilibrium is well studied on the scale of Darcy's law, it is less often considered in porous models. Heat transfer can be accounted for by creating a «heat network» based on a porous network model representing a set of fluid-conducting channels with an appropriate solution to the unified energy balance equation. It is also necessary to take into account convective transfer of thermal energy by the flow of liquid phases (oil, water), each of which is represented by a separate network. Knowing temperature field distribution in the texture of each lithological type of rock, it is possible to determine the probabilistic displacement of the fluid displacement front in the corresponding fluid-conducting space of the rock.

Objective: neural network modeling temperature field effect on the filtration characteristics of hydrocarbons in the fluid-conducting space of rocks.

Objects: polymictic sandstones of the Tyumen Formation.

Methods. Digital reconstruction of rock texture was performed using artificial intelligence methods and neural networks; neural network algorithms of probabilistic displacement front of two-phase flow (oil, water) were developed in Python programming language; methodical approach to the study of thermal field propagation in rock texture and its influence on two-phase fluid flow was developed using Fourier law, Navier–Stokes equations and similarity criteria of hydrocarbon systems.

Results. We developed the algorithms for neural network modeling of the temperature field in the fluid-conducting space of a rock (polymictic sandstone) as well as neural network algorithms to estimate the displacement of two-phase filtration front under the corresponding influence of the temperature distribution in the texture of a digital core. The basic mathematical models of these algorithms are outlined. The source code of the algorithms is written in the Python programming language with additional use of non-commercial libraries. The results of neural network modeling have a high degree of reliability, confirmed by experiments with the data obtained in the laboratory of core studies (University of Tyumen, Tyumen), the laboratory of the V.I. Shpilman Research and Analytical Centre for the Rational Use of the Subsoil (Khanty-Mansiysk), laboratory of digital research in oil and gas in the framework of the technological project «Digital core» (Industrial University of Tyumen, Tyumen).

Key words:

void space, core, convection, conduction, temperature, porous network model, fluid, slice, diffusion, model, flow, phase.

The article was prepared within the frames of technological project «Digital core», implemented in the world level Western Siberian interregional scientific and educational center.

REFERENCES

1. Vu J. *Modelling of convective heat transfer in porous media*. Thesis for the Master of Engineering Science degree in Mechanical and Materials Engineering. London, 2017. 84 p.
2. Shams M., Singh K., Bijeljic B., Blunt M.J. Direct numerical simulation of pore-scale trapping events during capillary-dominated two-phase flow in porous media. *Transport in Porous Media*, 2021, no. 2 (138), pp. 443–458.
3. Koch T., Weishaupt K., Müller J., Weigand B., Helmig R. A (dual) network model for heat transfer in porous media. *Transport in Porous Media*, 2021, no. 1 (140), pp. 107–141.
4. Cimrman R. SfePy-write your own FE application. *Proc. of the 6th EUR. Conf. on Python in Science*. West Bohemia, 2014. pp. 65–69.
5. Katanov Yu.E., Yagafarov A.K., Kleshchenko I.I., Savina M.E., Shlein G.A. Study of the effect of capillary phenomena in the filtration of two-phase immiscible liquids in porous media. *Proceedings of the higher educational institutions. Oil and Gas*, 2020, no. 1, pp. 19–29. In Rus.
6. Katanov Y.E., Vaganov Y.V., Listak M.V. Geological and mathematical description of the rocks strain during behaviour of the producing solid mass in compression (Tension). *Journal of Mines, Metals and Fuels*, 2020, no. 9 (69), pp. 285–292.
7. Madejski P., Krakowska P., Habrat M., Puskarczyk E., Jędrzychowski M. Comprehensive approach for porous materials analysis using a dedicated preprocessing tool for mass and heat transfer modeling. *Journal of Thermal Science*, 2018, no. 5 (27), pp. 479–486.
8. Quintard M., Kaviany M., Whitaker S. Two-medium treatment of heat transfer in porous media: numerical results for effective properties. *Advances in water resources*, 1997, no. 2 (20), pp. 77–94.
9. Liu Z., Wu H. Pore-scale study on flow and heat transfer in 3D reconstructed porous media using micro-tomography images. *Applied Thermal Engineering*, 2016, no. 100, pp. 602–610.

10. Deng Z., Liu X., Huang Y., Zhang C., Chen Y. Heat conduction in porous media characterized by fractal geometry. *Energies*, 2017, no. 8 (10), pp. 1230–1243.
11. Ahmed B., Javed T. A study of full Navier-Stokes equations of peristaltic flow in a porous-saturated tube under the inducement of magnetic field: finite element analysis. *Chaos, Solitons & Fractals*, 2019, no. 125, pp. 79–87.
12. Choi H.S., Park H.C., Huh C., Kang S.G. Numerical simulation of fluid flow and heat transfer of supercritical CO₂ in micro-porous media. *Energy Procedia*, 2011, no. 4, pp. 3786–3793.
13. Abou-Zeid M.Y., Shaaban A.A., Alnour M.Y. Numerical treatment and global error estimation of natural convective effects on gliding motion of bacteria on a power-law nanoslime through a non-Darcy porous medium. *Journal of Porous Media*, 2015, vol. 65, no. 12, pp. 647–655.
14. Haffén S., Géraud Y., Diraison M., Dezayes C. Determining fluid flow zones in a geothermal reservoir from thermal conductivity and temperature. *Geothermics*, 2013, no. 46, pp. 32–41.
15. Tembely M., AlSumaiti A.M., Jouini M.S., Rahimov K. The effect of heat transfer and polymer concentration on non-Newtonian fluid from pore-scale simulation of rock X-ray micro-CT. *Polymers*, 2017, no. 9 (10), pp. 509–527.
16. Liu S., Masliyah J.H. Dispersion in porous media. *Handbook of porous media*. Liverpool, CRC Press, 2005. pp. 99–160.
17. Liu H., Zhao X. Thermal conductivity analysis of high porosity structures with open and closed pores. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2022, no. 183, pp. 122089.
18. Nazari M., Mahmoudi Y., Hooman K. Introduction to fluid flow and heat transfer in porous media. *Convective heat transfer in porous media*. Belfast, CRC Press, 2019. pp. 3–18.
19. Reynolds C.A., Menke H., Andrew M., Blunt M.J., Krevor S. Dynamic fluid connectivity during steady-state multiphase flow in a sandstone. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2017, no. 31 (114), pp. 8187–8192.
20. Dullien F.A. *Porous media: fluid transport and pore structure*. Ann Arbor, Academic press, 1979. 416 p.
21. Leary P., Malin P., Niemi R. Fluid flow and heat transport computation for power-law scaling poroperm media. *Geofluids*, 2017, no. 3, pp. 1–12.
22. Maes J., Menke H.P. GeoChemFoam: direct modelling of flow and heat transfer in micro-CT images of porous media. *Heat and Mass Transfer*, 2022, no. 58, pp. 1–11.
23. Adivarahan P., Kunii D., Smith J.M. Heat transfer in porous rocks through which single-phase fluids are flowing. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 1962, no. 2 (03), pp. 290–296.
24. Liu J., Yu P., Li Y., Wan C., Du D. Numerical simulation on convective heat transfer characteristics in porous media based on the digital rock technology. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2022, no. 196, pp. 123323.
25. Afshari S., Hejazi S.H., Kantzas A. Pore-scale modeling of coupled thermal and solutal dispersion in double diffusive-advective flows through porous media. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2020, no. 147, pp. 118730.
26. Sosnowski P. *Numerical investigation of evaporation and condensation of thin films in conjugated heat transfer systems*. Trieste, Italy, School of Doctorate in Environmental and Industrial Fluid Mechanics XXV Cycle, 2013. 129 p.
27. Markov S.I., Shurina E.P., Itkina N.B. A multi-scale discontinuous Galerkin method for mathematical modeling of heat conduction processes with phase transitions in heterogeneous media. *Journal of Physics: Conference Series*. IOP Publishing, 2019, vol. 1333, no. 3, pp. 032052.
28. Carnevale L., Anjos G., Mangiavacchi N. Stream function-vorticity formulation applied in the conjugated heat problem using the fem with unstructured mesh. *Group of Environmental Studies for Water Reservoirs – GESAR*, 2018, no. 121, pp. 20940.

Received: 27 February 2023.

Reviewed: 3 March 2023.

Information about the authors

Yuri E. Katanov, Cand. Sc., associate professor, leading researcher, Industrial University of Tyumen.

Alik K. Yagafarov, Dr. Sc., Honored Geologist of the Russian Federation, Academician of V.I. Vernadsky Russian Academy of Natural Sciences, Honored Oil Worker of the Tyumen Region, professor, Industrial University of Tyumen.

Artem I. Aristov, laboratory researcher, Industrial University of Tyumen.

УДК 651.263:622.691.24

ПЕРВЫЙ ОПЫТ ЗОНАЛЬНОГО ПРОГНОЗА МОСКОВСКОГО АРТЕЗИАНСКОГО БАССЕЙНА ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ ПРОЕКТОВ CCS

Новиков Дмитрий Анатольевич^{1,2},
NovikovDA@ipgg.sbras.ru

Фомина (Садыкова) Яна Владиславовна^{1,2},
SadykovaYV@ipgg.sbras.ru

Юрчик Ирина Ивановна¹,
YurchikII@ipgg.sbras.ru

Деркачев Антон Сергеевич¹,
a.derkachev@g.nsu.ru

Черных Анатолий Витальевич¹,
ChernykhAV@ipgg.sbras.ru

Дульцев Федор Федорович¹,
DultsevFF@ipgg.sbras.ru

Максимова Анастасия Алексеевна^{2,1},
rock.nastaya64@gmail.com

Никитенков Алексей Николаевич³,
sputnik70@yandex.ru

Князев Александр Геннадьевич⁴,
KnyazevAG@luch-protvino.ru

¹ Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Коптюга, 3/6.

² Новосибирский государственный университет,
Россия, 630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 1.

³ Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

⁴ АО «НИИ НПО "ЛУЧ"»,
Россия, 142281, г. Протвино, ул. Железнодорожная, 5.

Актуальность исследования обусловлена значительным ростом выбросов парниковых газов в мире, что является наиболее важной экологической проблемой, приводящей к изменениям климата, таянию ледников и загрязнению атмосферы. Наиболее эффективным способом борьбы с выбросами является долговременное размещение углекислого газа в геологических формациях. Поскольку наибольшая концентрация предприятий-эмитентов углекислого газа зафиксирована в Европейской части Российской Федерации, обустройство хранилищ углекислого газа целесообразно организовывать в пределах Московского артезианского бассейна.

Целью исследования являлось проведение зонального прогноза перспектив реализации проектов CCS на территории Московского артезианского бассейна, выявление перспективных для размещения геологических структур и оценка потенциальной емкости ловушек для размещения углекислого газа.

Объектом исследования являются водоносные и водоупорные горизонты нижнего водоносного этажа Московского артезианского бассейна.

Методы. На основе действующей международной и российской нормативных баз по размещению углекислого газа, промышленных стоков, токсичных отходов, обустройству и мониторингу подземных газохранилищ предложена система критериев зонального прогноза гидрогеологических структур с целью реализации проектов по геологическому размещению углекислого газа в глубоких водоносных горизонтах. В систему оценки входят восемь групп критериев: общегидрогеологические, структурно-тектонические, литологические, гидродинамические, геотермические, гидрогеохимические, природоохранные и ресурсные. В пределах каждой группы критериев выделяются два и более параметра, влияющих на оценку пригодности территории для реализации проектов CCS.

Результаты. Впервые проведена оценка Московского артезианского бассейна с точки зрения пригодности для длительного хранения CO₂. Прогноз по предложенным критериям позволил закартировать земли с различными категориями перспективности. К среднеперспективным отнесены 16 геологических структур с величиной начальной емкости под размещение CO₂ в разрезе 150,6 млрд т в водорастворенном состоянии и 13,4 млрд т – в сверхкритическом. Кроме того, выделены низкоперспективные и бесперспективные области. Проведенный анализ позволяет перейти к локальной оценке среднеперспективных структур для осуществления лицензирования и выделения структур в фонд потенциальных хранилищ углекислого газа, что подразумевает более детальные исследования коллекторов и флюидоупоров, структурно-тектонических показателей, компьютерного моделирования взаимодействия в системе «вода–порода–газ» и проведение обязательных лабораторных экспериментов.

Ключевые слова:

проекты размещения углекислого газа, технология CCS, методика выделения перспективных объектов, критерии, осадочные бассейны, Россия, Московский артезианский бассейн.

Введение

Постоянное возрастание концентраций углекислого газа в атмосфере Земли в результате промышленных выбросов является наиболее важной экологической проблемой про-

шлого и текущего веков. Как известно, насыщение атмосферы CO₂, CH₄ и другими парниковыми газами приводит к глобальному потеплению – таянию ледников, росту уровня мирового океана и другим глобальным последствиям.

Регулярный мониторинг содержания CO_2 проводится с конца девятнадцатого века, первые достоверные доиндустриальные оценки составляли 290 ppm, сейчас эта цифра используется в качестве точки отсчета показателей загрязнения атмосферы. Выбросы парниковых газов в настоящее время находятся на самом высоком уровне в истории человечества [1]. По данным Всемирной метеорологической организации концентрация CO_2 в атмосфере Земли в 2020 г. составила 413,2 ppm. Среди крупнейших стран-эмитентов CO_2 Россия находится на четвертом месте (4,6 %), после Китая (30,7 %), США (13,8 %) и Индии (7,1 %) [2].

В 2019 г. примерно 34 % выбросов CO_2 в мире пришлось на энергетический сектор, 24 % – на промышленный, 22 % – на сельскохозяйственный, 15 % – на автомобильные выбросы и 6 % – на строительный сектор [1]. Таким образом, наибольшую долю занимают промышленный и энергетический сектор и при переходе на более экологичные методы производства существует возможность их сокращения.

В соответствии с Парижским соглашением к Рамочной конвенции ООН по изменению климата большинство стран мира (в т. ч. Россия) обязались не превышать выбросы парниковых газов в атмосферу по сравнению с ситуацией 1990 г. Стратегическая цель Парижского соглашения – удержание прироста глобальной средней температуры к концу XXI в. «намного ниже» 2°C сверх доиндустриальных показателей и «приложение усилий» для ограничения роста температуры на уровне $1,5^\circ\text{C}$ для максимального смягчения последствий изменения климата. По оценкам ведущих научно-исследовательских институтов и международных агентств, занимающихся вопросами изменения климата, сдерживание потепления среднемировой температуры на уровне $1,5\text{--}2^\circ\text{C}$ от доиндустриальных показателей будет занимать длительное время и в лучшем случае может быть достигнуто во второй половине XXI в. при развитии наилучших сценариев [3].

В целом фиксируется снижение среднегодовых выбросов парниковых газов за предшествующее десятилетие (2010–2019), этому способствовало введение социальных мер и внедрение новых технологий и инноваций в промышленное производство. Однако внедрение технологий, обеспечивающих снижение уровня выбросов углекислого газа, отстает в ряде развивающихся стран, поскольку имеют более высокую себестоимость, зависящую от иностранных поставщиков и квалифицированных специалистов. Всемирно признано, что наиболее эффективной технологией по снижению выбросов углекислого газа в атмосферу является осуществление проектов размещения CO_2 (carbon capture and storage – CCS).

Первые проекты по закачке и хранению CO_2 относятся ко времени использования CO_2 в качестве агента поддержания пластового давления при добыче углеводородов в 1972 г. Chevron SACROC CO_2 -EOR [4]. В 1990-х гг. концепция закачки CO_2 в подземные резервуары начинает рассматриваться для компенсации выбросов парниковых газов. В это же время проект Sleipner начал закачку CO_2 в Северном море [5–7].

Кроме того, размещение CO_2 в глубокозалегающих водоносных горизонтах применяется в проектах Снохвит в Норвегии, Баундери Дам, Зама в Канаде, Кетцин в Германии, Цитронелле, Декатор, Секарб Краффилд, Маунтанир и Фрио Брине в США, Ордос в Китае и др. [8–11]. Самый крупный проект – Вейберн в Канаде, начат в 2000 г. с целью увеличения нефтеотдачи пласта [12, 13]. Закачка углекислого газа в угольные пласты с целью обогащения метаном произведена в бассейне Сан-Хуан в Нью-Мексико [14–17]. В Нидерландах осуществлено размещение двуокси углерода на газовых месторождениях K12-B и P18-4 [18, 19]. В начале 2000-х гг. были завершены многочисленные фундаментальные исследования и пилотные масштабные программы, в том числе некоторые ключевые проекты, ориентированные на оценку крупномасштабной закачки, такие как эксперимент Frio [20], пилотный проект по хранению CO_2 в Нагаоке [21], партнерства по связыванию углерода Министерства энергетики США [22], программа ZERT [23], базовый мониторинг проекта Gorgon [24] и проект CCS в Салахе [25].

С 2010–2019 гг. было развернуто большинство проектов промышленного масштаба, таких как Quest, Snøhvit, Aquistore, ADM Decatur, Petra Nova и программа Carbonsafe Министерства энергетики США [3]. На сегодняшний день проект Sleipner является крупнейшим проектом CCS, при реализации которого на сегодняшний день было утилизировано более 15 млн т CO_2 .

Огромное внимание в мире уделяется исследованиям, связанным с изучением последствий размещения CO_2 в различных геологических формациях, моделированию происходящих при этом процессов, постановке и проведению лабораторных экспериментов, в том числе и с проведением исследования напряжений, диффузии и ряда других физических процессов, возникающих в пластах при их наполнении углекислотой [26–28]. Размещение углекислого газа в недра связано с нарушением естественных гидрогеологического, гидродинамического и геотермического режимов и может приводить к загрязнению подземной гидросферы, обусловленному возможной утечкой CO_2 через литологические окна и дизъюнктивные нарушения. Поэтому при выборе объекта для размещения необходимо иметь четкое представление о геологическом строении, гидрогеологических условиях и процессах взаимодействия в системе «вода–порода–газ», протекающих в пределах намеченной территории [29–32].

Изучение литологического состава пород коллекторов и флюидоупоров, их фильтрационно-емкостных свойств, особенностей гидрогеохимии пластовых флюидов, моделирование процессов, протекающих в системе «вода–порода–газ», и изменение этих процессов после закачки углекислого газа наиболее актуально в настоящее время. Подобные исследования проводятся многими авторами [33–37]. Кроме того, изучение изменений гидродинамического режима и процессов фильтрации проводят с помощью математического моделирования процесса размещения в рамках уравнений многофазной фильтрации [38–40].

В последние годы рассматривается множество вариантов по прогнозированию развития мировой экономики и ее энергетическому переходу к возобновляемым источникам. Среди них следует упомянуть исследования международных агентств и финансовых учреждений Bloomberg, Goldman Sachs, ЕЭК ООН и других [41–51]. Отдельные работы посвящены исследованиям по отдельным отраслям экономики, разработке и критериям технологии CCUS [52, 53].

Несмотря на активную дискуссию в научных изданиях по различным аспектам загрязнения атмосферы и обоснованию технологий по размещению углекислого газа, до настоящего времени в Российской Федерации нет действующих пилотных проектов и нормативных документов по требованиям к размещению CO₂. Тем не менее проведенный ранее авторами статьи региональный прогноз перспектив реализации проектов CCS на территории РФ показал, что существуют благоприятные предпосылки для размещения больших объемов CO₂ в пределах континентальной части страны [54].

Методика проведения зонального прогноза осадочных бассейнов России

Методика оценки пригодности гидрогеологических бассейнов и их частей для реализации проектов CCS включает в себя три уровня детальности. Самый начальный уровень – *региональный*, он является наиболее общим и позволяет оценить территорию как благоприятную или неблагоприятную для реализации проектов в целом [54]. На этом уровне рассматриваются общие характеристики геологического строения, структурно-тектонические особенности формирования региона, литологическое строение вмещающих толщ, гидрогеологические, гидродинамические и геотермические особенности бассейнов в целом и все существующие на момент оценки природоохранные ограничения. Кроме того, детально оценивается сейсмичность региона и наличие прочих глобальных ограничений. Второй уровень оценки перспектив территорий – *зональный*. На данном этапе уже могут быть оценены не только крупные гидрогеологические бассейны, но и их части, выделены перспективные водоносные горизонты для реализации проектов CCS как по латерали, так и в геологическом разрезе. На этом этапе может быть выполнено численное математическое моделирование и приведена экспертная оценка объемов возможной утилизации CO₂ в перспективных горизонтах. Последний наиболее детальный уровень прогноза – *локальный*. На данном этапе выполняется обоснование конкретных локальных геологических структур для проектирования полигонов для размещения углекислого газа с учетом действующих лицензионных соглашений, выданных ранее для добычи всех видов полезных ископаемых. Для этого детально оцениваются минералогические и литологические особенности пород-коллекторов и флюидоупоров, их фильтрационно-емкостные свойства, термобарические условия. Пристально изучаются гидрогеохимические характеристики подземных вод, моделируются гидрогеохимические процессы, протекающие в системе «вода–порода–углекислый

газ» для оценки геохимических последствий, сопровождающих размещение газа в коллекторе [54].

При *зональном* прогнозе наиболее значимыми являются восемь групп критериев: общегидрогеологические, структурно-тектонические, литологические, гидродинамические, геотермические, гидрогеохимические, природоохранные и ресурсные (табл. 1).

Структурно-тектонические факторы существенно влияют на возможность осуществления проектов CCS в артезианских бассейнах. Пригодные для размещения углекислого газа водоносные горизонты приурочены к определенным тектоническим типам структур, рассмотренным нами ранее на этапе регионального прогноза [54]. Прежде всего это обширные платформенные области и развитые в их пределах крупные отрицательные тектонические элементы – синеклизы первого и второго порядка. Краевые прогибы, предгорные и межгорные впадины оцениваются как менее перспективные и могут рассматриваться только в отдельных случаях. Водоносные горизонты, распространенные в пределах синеклиз, обычно отличаются достаточно предсказуемым литологическим строением, фациальной выдержанностью по площади, незначительными гипсометрическими колебаниями и отсутствием существенных тектонических дислокаций. Они являются наиболее предпочтительными для осуществления проектов геологического хранения CO₂.

Крупные положительные тектонические элементы: антеклизы, щиты и т. д., как правило, характеризуются сложным строением водоносных горизонтов, наличием разрывов и перерывов в осадконакоплении, их сокращенными мощностями, литологическими окнами, наличием большого количества тектонических нарушений. Они могут быть использованы для размещения углекислого газа, но необходимо более тщательно анализировать данные по динамике подземных вод и проследивать распространение водоносных и водоупорных горизонтов по площади и в разрезе.

При рассмотрении группы *литологических критериев* основными характеристиками, определяющими объем резервуара для закачки углекислого газа, являются выдержанность и литологический состав водоносных и водоупорных горизонтов и их коллекторские свойства. Кроме того, важным свойством является приемистость водоносного горизонта, которая в свою очередь зависит от толщины и степени проницаемости коллектора.

Наличие надежного флюидоупора является одним из важнейших критериев оценки пригодности территорий для геологического хранения углекислого газа. Для определения надежности водоупорного горизонта используются следующие параметры: морфологические признаки (площадь распространения, толщина), литологический и минералогический состав, степень однородности, выдержанности по площади и в разрезе, экранирующие свойства. По площади распространения различаются региональные, субрегиональные, зональные и локальные флюидоупоры. Непосредственно для структуры-ловушки, куда будет закачиваться CO₂, в зависимости от экранирующих свойств достаточным может быть наличие локальной

или зональной покрывки. Однако для защиты выше-лежащих водоносных горизонтов, используемых для хозяйственно-питьевых или бальнеологических целей, обязательным условием является наличие региональных или субрегиональных флюидоупоров, отделяющих целевые водоносные горизонты от буферной зо-

ны. Установлено, что именно региональные и субрегиональные водоупорные горизонты, образовавшиеся на трансгрессивном этапе седиментогенеза, имеют большие площади распространения, выдержанные мощности, отличаются высокой степенью однородности и хорошими экранирующими свойствами.

Таблица 1. Критерии зонального уровня при оценке осадочных бассейнов Российской Федерации для реализации проектов CCS

Table 1. Criteria of CCS suitability for evaluating sedimentary basins in Russia: subregional (zonal) level

Общегидрогеологические (I) Hydrogeology (I)	Структурно-тектонические (II) Tectonics (II)	Литологические (III) Lithology (III)	Гидродинамические (IV) Flow regime (IV)
<i>Гидрогеологические структуры:</i> артезианские бассейны и своды; предгорные и межгорные артезианские бассейны; отсутствие массивов складчатых областей и щитов; <i>Тип гидрогеологических тел:</i> пластовые. <i>Тип подземных вод по характеру проницаемости пород:</i> поровый, трещинный, карстовый. <i>Hydrogeological structures:</i> Aquifers and aquicludes in artesian basins and uplifts; piedmont and intermontane artesian basins, Lack of orogens or shields; <i>Type of hydrogeological bodies:</i> reservoir. <i>Type of groundwater based on the nature of rock permeability:</i> pore, interstitial, karst	<i>Тектонические структуры:</i> платформы и плиты; отсутствие складчатых областей и щитов; <i>Отсутствие</i> активных разломов и сейсмических событий с магнитудой более 5 баллов; <i>Глубина залегания</i> целевого горизонта от 800 до 3000 м; <i>Тип ловушки:</i> структурные и литологические. <i>Tectonic structures:</i> Cratons and plates; No orogens and shields; Absence of active faults and M>5 earthquakes; <i>Depth to aquifer</i> is from 800 to 3000 m; <i>Type of trap:</i> structural and depositional	<i>Наличие</i> выдержанных коллекторов терригенного и карбонатного состава регионального или зонального уровня; <i>Пористость:</i> >10 %; <i>Проницаемость:</i> >0,5 мкм² <i>Приемистость:</i> ≥50 м³/сут. <i>Наличие</i> выдержанных флюидоупоров регионального или зонального уровня (глины/аргиллиты, угли, мергели, соли, гипсы и ангидриты). <i>Мощность</i> целевого горизонта ≥15 м. <i>Мощность</i> флюидоупора ≥20 м. <i>Availability of continuous regional- or zonal-scale clastic and carbonate formations;</i> <i>Porosity</i> >10 %; <i>Permeability</i> >0,5 μm²; <i>Injectivity</i> ≥50 м³/day; <i>Availability of continuous regional- or zonal-scale clay/shale, coal, marl, salt, gypsum, or anhydrite aquicludes</i> <i>Aquifer thickness</i> ≥15 m; <i>Aquiclude thickness</i> ≥20 m	<i>Удаленность</i> от региональных областей питания и разгрузки подземных вод; <i>Наличие</i> зон затрудненного и застойного водообмена; <i>Преобладание</i> в водоносных горизонтах элизионного режима; <i>Высокая</i> степень гидрогеологической закрытости недр; <i>Отсутствие</i> зон межпластовых перетоков; <i>Расположение</i> целевого горизонта в интервале пластовых давлений: >7,0 МПа для водорастворенного CO₂ и >7,4 МПа для сверхкритического состояния CO₂; <i>Отсутствие</i> зон повышенных и аномально высоких пластовых давлений со значениями Ka>1,05. <i>Long distance</i> from regional re-charge and discharge zones; <i>Availability of zones of impaired and stagnant water exchange;</i> <i>Flow mostly by expulsion;</i> <i>Sealed aquifers;</i> <i>No flow between aquifers;</i> <i>Aquifers at reservoir pressures >7,0 MPa for dissolved CO₂ and >7,4 MPa for supercritical CO₂;</i> <i>No overpressure (Ka<1,05)</i>
Геотермические (V) Geothermal (V)	Гидрогеохимические (VI) Water chemistry (VI)	Природоохранные (VII) Environment (VII)	Ресурсные (VIII) Resource (VIII)
<i>Отсутствие</i> гидрогеотермических аномалий; <i>Расположение</i> целевого горизонта в интервале пластовых температур: >15 °С для водорастворенного CO₂ и >31,1 °С для сверхкритического состояния CO₂. No heat flux anomalies; Aquifer temperature >15 °C for dissolved CO₂ and >31,1 °C for supercritical CO₂.	<i>Наличие</i> в целевом горизонте подземных вод с величиной общей минерализации ≥20 г/дм³ преимущественно хлоридного натриевого состава; <i>Отсутствие</i> в целевом и буферных горизонтах подземных вод питьевого, бальнеологического, промышленного и теплоэнергетического назначения; <i>Отсутствие</i> негативных геохимических последствий закачки CO₂ в целевой горизонт (оценка методами численного физико-химического моделирования и/или лабораторных экспериментов). <i>Availability of mainly</i> ≥20 g/L NaCl saline waters; <i>No aquifers and buffer zones used for drinking, spa, industrial, and power production;</i> <i>No negative chemical effects from CO₂ injection into aquifers (estimation by thermodynamic modeling and/or laboratory experiments)</i>	<i>Отсутствие</i> особо-охраняемых природных территорий; <i>Наличие</i> буферных зон от крупных населенных пунктов ≥25 км; <i>Отсутствие</i> ресурсов, используемых для питьевых, бальнеологических и народнохозяйственных целей; <i>Наличие</i> буферных водоносных горизонтов выше и ниже целевого. <i>No protected conservation territories;</i> <i>Availability of buffer zones</i> ≥25 km away from urban areas; <i>No drinking, spa, and economic water supplies;</i> <i>Availability of buffer aquifers above and below storage aquifers</i>	<i>Отсутствие</i> на перспективной территории ограничений хозяйственной деятельности в соответствии с действующими лицензионными соглашениями на разные виды полезных ископаемых; <i>Наличие</i> потенциальных ловушек для реализации проектов CCS; <i>Емкость</i> потенциальной ловушки должна соответствовать предполагаемому объему закачки CO₂ на все время реализации проекта. <i>No limitations from subsoil use regulations;</i> <i>Availability of potential traps for CCS projects;</i> <i>Storage capacity of potential traps must correspond to expected volume of CO₂ injection</i>

Плотность CO_2 в сверхкритическом состоянии составляет около $0,6\text{--}0,7 \text{ г/дм}^3$, что намного меньше плотности подземных вод и рассолов, поэтому при закачке в пласт углекислый газ после предельного насыщения подземных вод будет подниматься к его кровельной части [8]. В этой связи для обеспечения долгосрочного хранения углекислого газа в недрах необходимо, чтобы в оцениваемом регионе были развиты структурные, стратиграфические и литологические ловушки, обладающие большим объемом и обеспечивающие наиболее надежную герметизацию техногенной залежи.

Гидродинамическая зональность артезианских бассейнов связана с тем, что динамика подземных вод различных водоносных комплексов существенно различается. Традиционно выделяют три гидродинамические зоны: интенсивного, замедленного или затрудненного и застойного водообмена [55]. Они располагаются в бассейне сверху вниз по разрезу. Первая зона характеризуется неглубоким расположением водоносных горизонтов, их тесной гидравлической взаимосвязью, преобладанием инфильтрационного водообмена. В ней распространены пресные и солоноватые, преимущественно гидрокарбонатные кальциевые воды (до 20 г/дм^3) с коэффициентом закрытости недр до 50. Как правило, зона распространена до глубин $100\text{--}400 \text{ м}$. Эта зона не может быть использована для размещения углекислого газа, поскольку в ее пределах активно протекают процессы миграции подземных вод и содержащихся в них газов. Вторая зона приурочена к средней части осадочного чехла артезианских бассейнов. Характеризуется отсутствием гидравлической взаимосвязи между горизонтами, вертикальной миграцией флюидов только по дизъюнктивным нарушениям, преимущественно элизионным гидродинамическим режимом, наличием соленых и рассолов с напорных вод хлоридного натриевого состава. Минерализация вод колеблется от 20 до 100 г/дм^3 , и коэффициент закрытости недр варьирует от 50 до 100 . Третья зона застойного водообмена приурочена к нижней части осадочного чехла и породам фундамента. Характеризуется минимальными скоростями фильтрации, элизионным водообменом, процессами метаморфизации состава подземных вод, преобладанием хлоридного натриевого состава соленых вод и рассолов с высокой долей кальция и повышенным содержанием бора, брома, йода и других микрокомпонентов. Минерализация рассолов, как правило, превышает 100 г/дм^3 , а коэффициент закрытости недр изменяется от 100 до 300 . Таким образом, зона затрудненного водообмена с преобладанием элизионного режима и наличием вод хлоридного натриевого состава с величиной общей минерализации более 20 г/дм^3 характеризуется высокой степенью закрытости недр и позволяет рассматривать приуроченные к ней водоносные горизонты в качестве наиболее перспективных для реализации проектов CCS.

Динамика подземных вод также тесно связана с глубиной залегания перспективных водоносных горизонтов. Наиболее подходящие горизонты для разме-

щения углекислого газа приурочены к глубинам более 800 м . В данном интервале влияние инфильтрационного водообмена уже не наблюдается, преобладает элизионный водообмен, но при этом еще не происходит значительной метаморфизации состава подземных вод и, как правило, термобарические условия благоприятны.

Гидродинамические условия и геотермический режим недр в артезианских бассейнах значительно меняются по площади и разрезу. Поэтому при оценке осадочного бассейна необходимо учитывать следующие факторы: тип бассейна, возраст вмещающих толщ и сейсмическую активность, тепловой поток, теплопроводность пород и температуру в кровле целевого водоносного горизонта. В характерной для углекислого газа критической точке ($7,38 \text{ МПа}$ и $31,1 \text{ }^\circ\text{C}$, эквивалентно гидростатическому напору 738 м) даже небольшое изменение геотермического градиента приводит к переходу CO_2 в сверхкритическое состояние. Если принять пластовое давление в осадочном бассейне равным гидростатическому, то минимальная пороговая глубина для закачки CO_2 в сверхкритическом состоянии при геотермическом градиенте $30 \text{ }^\circ\text{C/км}$ и температуре дневной поверхности $10 \text{ }^\circ\text{C}$ составляет около 800 м [17, 56]. Для проектов CCS минимальная глубина может быть менее 800 м , только если CO_2 закачивается в надежно экранированные угольные пласты. Пилотным экспериментом по хранению CO_2 в этих условиях является проект Кетцин в Германии [57, 58]. Однако этот эксперимент не получил общественной поддержки из-за опасений по поводу возможной утечки газа.

Гидродинамический режим подземных вод (включая пластовое давление, соленость и скорость фильтрации) имеет ключевое значение для проектов по геологическому хранению CO_2 , особенно при закачке в истощенные нефтяные и газовые залежи. Зоны повышенных и аномально высоких пластовых давлений не могут рассматриваться в качестве перспективных. Области с пониженным давлением лучше всего подходят для геологического удержания и хранения CO_2 , т. к. они способны компенсировать увеличение пластового давления во время закачки.

В гидродинамическом режиме дизъюнктивные нарушения также играют важную роль. Миграция подземных вод по проводящим тектоническим разломам является одной из основных форм разгрузки подземных вод глубокопогруженных водоносных горизонтов. При выборе участка для закачки углекислого газа необходимо убедиться в отсутствии проводящих разломов. Кроме того, необходимо тщательно анализировать существующие структурно-тектонические схемы и сейсмические материалы, поскольку герметичность флюидоупора напрямую зависит от разломной тектоники.

Среди *группы природоохранных критериев* наиболее важно соблюдать профилактические меры для защиты горизонтов, используемых для народнохозяйственных целей. В настоящее время отсутствуют нормативные документы по проектированию и строительству подземных хранилищ углекислого газа

в Российской Федерации, но существуют и успешно применяются действующие документы по размещению токсичных отходов и проектированию подземных хранилищ природного газа. По аналогии с ними размещение углекислого газа запрещено в пределах границ крупных населенных пунктов (не менее 500 м от жилых зданий), мест отдыха населения и санаторно-курортных зон. Также запрещено обустройство вблизи зон санитарной охраны водоисточников, заболоченных и подтопленных участков, зон питания и выклинивания водоносных горизонтов [59–62].

Необходимым условием при выборе водоносного горизонта для целей CCS является наличие между ним и объектами, содержащими воды питьевого и бальнеологического назначения, буферных горизонтов, надежно изолированных в кровле и подошве флюидоупорами [61, 62]. Они выступают дополнительной защитой от межпластовых перетоков флюидов и процессов вертикальной миграции углекислого газа и должны содержать воды, не пригодные для питьевых и иных целей.

Кроме того, как отмечается Федеральным законом «Об особо охраняемых природных территориях» от 14.03.1995, запрещается размещение и утилизация углекислого газа и других отходов производства в границах особо охраняемых природных территорий (ООПТ) и в пределах границ крупных населенных пунктов [63]. Следовательно, они исключаются автоматически из участков, пригодных для реализации проектов геологического хранения CO_2 . ООПТ могут иметь федеральное, региональное или местное значение, они делятся на государственные природные заповедники, в том числе биосферные заповедники, национальные парки, природные парки, государственные природные заказники, памятники природы, дендрологические и ботанические сады, хозяйственная деятельность на которых не осуществляется [63].

Основная цель группы *ресурсных* критериев заключается в изучении существующих ограничений хозяйственной деятельности в соответствии с действующими лицензионными соглашениями на все виды полезных ископаемых. Применение технологии геологического хранения подразумевает наличие ловушек и необходимость оценки их емкости. На уровне зонального прогноза расчеты должны быть осуществлены в масштабе артезианских бассейнов или их частей с помощью численного моделирования. Оценка емкости хранения CO_2 в глубоких водоносных горизонтах является весьма сложной, поскольку задействованы различные механизмы улавливания и связывания углекислого газа, которые действуют с различной скоростью и иногда происходят синхронно. Достоверные данные могут быть получены только в локальном масштабе или на конкретном участке, выбранном для размещения [64].

Обычно оценка достаточно подробно выполняется на предпроектной стадии, когда один или несколько участков, перспективных для хранения CO_2 , исследуются для определения их емкости и возможной интенсивности закачки, и способствует принятию решения о выборе конкретного участка. Расчеты вклю-

чают численное моделирование процессов размещения и технико-экономическое обоснование целесообразности выбора объекта. В большинстве случаев этот анализ ложится в основу процесса выдачи лицензии для осуществления проекта CCS.

В процессе исследования авторами статьи была разработана собственная методика оценки потенциальной предельной емкости перспективных структур для утилизации водорастворимой составляющей углекислоты. Расчет объемов состоит из нескольких этапов. Первый этап – оценка газонасыщения раствора углекислотой средствами программного комплекса HydroGeo. Реализован он путём вычислений, состоящих из двух основных подэтапов. На первом из них осуществляется оценка максимальной растворимости углекислоты в растворе применительно к его текущим термодинамическим параметрам. Проводится она по эмпирическим формулам, представляющим следующую систему уравнений, включающих ряд регрессионных коэффициентов, а также коэффициентов перехода между единицами измерения:

$$x_1 = 0,115 - 4 \cdot 10^{-4} \cdot t,$$

где t – температура в Кельвинах.

$$x_2 = \exp(2,3026 \cdot (x_1 - 4,45e^{-3} \cdot m) \cdot m),$$

где m – эквивалентная масса катионов в растворе;

$$x_3 = x_2 \cdot 22,261 \cdot (0,04639 + 0,00415 \cdot t) \cdot 100 \cdot 1000.$$

Максимальная растворимость углекислоты

$$\chi \text{CO}_2 (\text{г/дм}^3) = 1/x_3 \cdot (g - \min) \cdot (g_{\text{нас}} \cdot p \cdot 10^{-6}) \cdot x \text{CO}_2 \cdot m_v,$$

где g – плотность раствора; $\min$ – минерализация раствора; $g_{\text{нас}}$ – коэффициент газонасыщения; p – давление, Па; $x \text{CO}_2$ – содержание CO_2 в %-об. в газовой фазе; m_v – молекулярный вес CO_2 .

На втором подэтапе осуществляется оценка реальной растворимости. Она выполняется путём итерационного добавления в раствор порций углекислоты, оцениваемых по значению максимального насыщения и вплоть до его достижения. На каждом шаге осуществляется увязка происходящих в растворе физико-химических изменений: пересчёт взаимодействий внутри гидрокарбонатной системы ($\text{CO}_2\text{-H}_2\text{CO}_3\text{-HCO}_3^-$), расчёт комплексообразования и коррекция содержания ионов водорода. Расчет производится вплоть до достижения относительной погрешности метода $<0,01\%$.

Второй этап оценки ёмкости – расчёт предельных величин газорастворения в конкретных структурах, сводящийся также к двум подэтапам: первому, включающему в себя расчёт газонасыщения раствора структуры с соответствующими термодинамическими параметрами (на основе величины минерализации, давления и внутрипластовой температуры). И второму, включающему оценку максимальной теоретической ёмкости пласта, осуществляющемуся путём перемножения средней эффективной мощности пласта на коэффициент пористости и на площадь распространения структуры (для расчёта доступного для улавливания углекислоты объёма), которые, в свою очередь, доумножаются на расчётную удельную ве-

личину газорастворения. В результате расчётов получаем для каждой из структур величины: $C_{\max}$, характеризующую теоретическую максимальную ёмкость структуры, и $C_{0,1}$, дающую величину в 10 % от теоретической максимальной и являющуюся консервативной оценкой величины размещения углекислоты в

конкретную структуру в соответствии с рекомендациями.

Рассмотрим подробнее критерии зонального прогноза на примере Московского артезианского бассейна (МАБ) (рис. 1).



Рис. 1. Местоположение Московского артезианского бассейна: 1 – граница Московского бассейна; 2 – административные границы областей Московского бассейна; 3 – тектонические границы: 1 – Воронежская (антеклиз), 2 – Волго-Уральская (антеклиз), 3 – Московская (синеклиз), 4 – Нарва-Онежская (моноклиз); 4 – административная граница России

Fig. 1. Location of the Moscow Artesian Basin: 1 – boundary of the Moscow Basin; 2 – administrative borders of the regions of the Moscow basin; 3 – tectonic boundaries: 1 – Voronezh (antecline), 2 – Volga-Ural (antecline), 3 – Moscow (syncline), 4 – Narva-Onega (monocline); 4 – administrative border of Russia.

Гидрогеологическое строение Московского артезианского бассейна

На начальном этапе зонального прогноза выполняется детальная гидрогеологическая стратификация разреза для оценки наличия водоносных и водоупорных горизонтов в разрезе, изучаются особенности литологического и минералогического состава пород и их фильтрационно-ёмкостные свойства (в первую очередь пористость и проницаемость), также прослеживается их распространение по латерали, выделяют основные типы гидрогеологических разрезов. Диагностируются зоны активного, затрудненного и застойного водообмена. Оценивается преобладающий тип водообмена для каждого горизонта. Определяются зоны питания и разгрузки подземных вод.

К настоящему времени территория МАБ изучена достаточно слабо: покрыта редкой сетью региональных сейсмических профилей и отдельными глубокими скважинами (опорными, параметрическими и поисковыми), вскрыты отложения фундамента и осадочного чехла. В строении Московского бассейна выделяются два гидрогеологических этажа: нижний – затрудненного и застойного водообмена и верхний – активного водообмена.

Нижний этаж включает в себя зону трещиноватости архейско-нижнепротерозойского фундамента, рифейский, вендский, кембрийский, ордовикский, силурийский, девонский и каменноугольно-триасовый комплексы [66].

Верхний этаж сложен юрско-меловым, палеогено-неогеновым и четвертичным водоносными комплексами (ВК). Среди осадков преобладают слабосцементированные терригенные, которые неравномерно распространены по площади. Максимальные толщины (до 400 м) зоны активного водообмена соотносятся с речными долинами и отрицательными тектоническими структурами. В пределах верхнего водоносного этажа преобладают пресные HCO_3 Ca-Mg воды с минерализацией до 1 г/дм³, по мере погружения водоносных горизонтов закономерно увеличиваются общая минерализация и концентрации Cl и Na. Внешние зоны питания подземных вод приурочены к участкам выхода горизонтов на поверхность, а зоны разгрузки – к руслам рек. Зона активного водообмена не может рассматриваться в качестве потенциального объекта размещения углекислого газа, так как водоносные горизонты используются повсеместно для питьевого водоснабжения населения.

Фундамент Восточно-Европейской платформы на исследуемой территории представлен сланцами, гнейсами, амфиболитами, мраморами и катаклазитами, интенсивно метаморфизованными и гидротермально измененными. Скважинами вскрыт разрез фундамента, редко превышающий первые десятки метров, наиболее полно в скважине Любимовская 5. В результате длительного перерыва в осадконакоплении в дорифейское время образовались коры выветривания мощностью от 1 до 30 м. По результатам опробования скважин из этих пород получены рассолы Cl Na состава с минерализацией 250–270 г/дм³. Вероятнее всего, существует гидравлическая взаимосвязь между архейско-нижнепротерозойской зоной экзогенной трещиноватости и рифейскими, вендскими и кембрийскими горизонтами. Для питьевых и технических целей эти воды не используются.

В центральных районах Московской синеклизы разрез осадочного чехла наиболее полный и включает в себя рифейские, вендские, кембрийские, ордовикские, силурийские и пермские отложения, распространенные фрагментарно, и более широко – девонские, каменноугольные, триасовые, юрские, меловые, неогеновые и четвертичные. Фундамент полого погружается к центральным районам синеклизы, где его глубина залегания достигает 3500 м.

В нем сформирована разветвленная рифтовая система позднерифейского возраста, разделенная серией крупных тектонических разломов. Авлакогены полностью компенсированы осадками, по данным геофизических исследований их мощность достигает 5,5 км, в разрезе преобладают пестроцветные слабоокатанные кварц-полевошпатовые песчаники (до 70 %) и алевролиты с глинистым цементом. Наиболее полно комплекс изучен в центральной части рифтов на Солигаличской и Рослятинской площадях, где вскрытая мощность достигает двух километров. Сведения о коллекторских свойствах горизонтов рифея немногочисленны. По имеющимся данным, пористость песчаников оценивается в 0,57–12 %, а проницаемость от долей до $21 \cdot 10^{-15}$ м². Плотность составляет 2,5–2,7 г/см³. Проницаемость аргиллитов от 0,01 до $12 \cdot 10^{-15}$ м² [66]. Рифейский водоносный комплекс содержит сверхкрепкие рассолы Cl Na типа с минерализацией, достигающей 300 г/дм³. Для питьевого водоснабжения населения не используется.

Нижневендские осадки (пачелмская и волинская серии) сохранились лишь в пределах рифтовых зон, имеют незначительную мощность и представлены темноцветными аргиллитами и алевролитами в нижней части и красноцветными и сероцветными песчаниками с прослоями аргиллитов и алевролитов – в верхней. Верхневендские осадки распространены значительно шире, они залегают трансгрессивно на низзалегających отложениях и породах фундамента со структурным и стратиграфическим несогласием, в плане образуют крупную тектоническую структуру первого порядка – Московскую синеклизу (верхнебайкальский этап).

На юго-востоке Московская синеклиза граничит с Воронежским кристаллическим массивом, сложенным архей-нижнепротерозойскими породами фунда-

мента и являющимся основным источником сноса обломочного материала. Верхневендские отложения представлены ритмичным переслаиванием мелководно-морских терригенных осадков с примесью туфогенных, циклы начинаются песчаными пачками и заканчиваются глинистыми. В разрезе выделяется редкинская и поваровская свиты, разделенные региональным несогласием. Достаточно надежных водупорных толщ в пределах вендского комплекса не установлено, но вышележающие осадки палеозойского возраста обладают надежными экранирующими свойствами. Суммарная мощность комплекса достигает 600 м. Максимальные толщины выявлены в пределах наиболее глубоких прогибов фундамента в центральной части Московской синеклизы.

В результате опробования диагностированы сверхкрепкие рассолы с минерализацией до 300 г/дм³ Cl Na состава и значительными концентрациями Ca и Br. Соленость вод прямо пропорциональна глубине залегания комплекса. При неглубоком залегании минерализация вод может составлять до 20–50 г/дм³ за счет процесса инфильтрации атмосферных осадков и тесной гидродинамической связи с вышележащими комплексами. Для питьевых и бальнеологических целей комплекс не используется.

В результате изучения фильтрационно-емкостных свойств вендских отложений в разрезе выделены две перспективные для размещения углекислого газа пачки песчано-алевролитового состава. Нижняя приурочена к базальному слою редкинской свиты. Суммарная эффективная мощность варьирует от 0 до 45 м. Состав песчаников палеовшпат-кварцевый, цемент – глинисто-карбонатный, каолиновый. Коэффициент открытой пористости варьируется от 0,6 до 27,9 % при среднем от 7 до 12 %. Проницаемость песчаников изменяется от $0,01 \cdot 10^{-15}$ до $849 \cdot 10^{-15}$ м² при фоне $1\text{--}5 \cdot 10^{-15}$ м². Вторая песчаная пачка приурочена к основанию поваровской свиты. Открытая пористость изменяется от 5,3 до 11,6 %, проницаемость – от 0,1 до $10 \cdot 10^{-15}$ м². Песчаники имеют кварцевый и кварц-полевошпатовый состав. Их эффективная мощность составляет от 4–6 до 30 м в прогибах [66].

Кембрийский и ордовикский водоносные комплексы развиты фрагментарно в северной части МАБ, а силурийские отложения практически полностью эродированы в преддевонское время в результате длительного перерыва в осадконакоплении. Кембрийские осадки преимущественно терригенные, преобладают песчаные разности с редкими глинистыми прослоями. Ордовикские представлены аргиллитами с прослоями мергелей и известняков. Глубина залегания комплексов варьируется от 1100 до 2000 м, суммарная мощность достигает до 265 м. Между комплексами установлены многочисленные зоны межпластовых перетоков, т. к. между ними не имеется достаточно надежных водупорных толщ, в подошве флюидоупором служат «балтийские» синие глины. В результате опробования скважин получены Cl Na рассолы с минерализацией 150–300 г/дм³ с высокими концентрациями Br. Для питьевых целей комплексы не эксплуатируются.

Комплекс девонских пород развит повсеместно, он составляет значительную часть разреза осадочного чехла и соотносится с нижнегерцинским структурным ярусом. В тектоническом строении выделяются следующие крупные элементы – Псковско-Верхневолжская синеклиза, наследующая структуру Московской синеклизы, Воронежская и Волго-Уральская антеклизы, образовавшиеся на месте Воронежского и Волго-Камского кристаллических массивов. В восточной части региона выделяется Муромцевско-Сердобская зона линейных структур. В строении нижнегерцинского структурного яруса принимают участие разнофациальные отложения: нижняя часть девонского комплекса сложена преимущественно терригенными породами и связана с глобальной трансгрессией, верхняя часть представлена глинисто-карбонатной толщей. Глубина залегания комплекса варьируется от 0 м в пределах Воронежской антеклизы до 1000 м в пределах наиболее погруженных частей Псковско-Верхневолжской синеклизы.

В девонских отложениях выделяются фаменский, верхнефранский, среднефранский, живетский, эйфельский относительно водоупорный и эмский водоносные горизонты [65]. Водоупорные горизонты представлены глинистыми породами незначительной мощности и могут рассматриваться в качестве водоупорных толщ, но не могут служить покрышками для техногенных газовых залежей. Наиболее надежными водоупорными горизонтами являются зоны развития соленосных и ангидритовых пород в западной и северо-восточной частях МАБ, которые могут обеспечить наибольшую сохранность техногенных залежей углекислого газа. Эвапоритовые породы образовывались в эйфельское время (дорогобужская и клинцевская свиты) в условиях солеродного закрытого бассейна и имеют мощность до 120 м, а гипсо-ангидритовые (оптуховская, плавская, озерская и хованская свиты) – в средне-верхнефаменское, в лагунно-морских условиях и достигают толщин до 175 м.

В пределах девонского комплекса выявлены зоны развития вод различного состава и минерализации. Пресные и слабосоленоватые (до $1,5 \text{ г/дм}^3$) HCO_3 Na-Ca воды распространены в западной, южной и юго-западной частях Московского артезианского бассейна, где горизонт характеризуется неглубоким залеганием и перекрыт незначительными по мощности мезо-кайнозойскими и каменноугольными осадками. По мере погружения комплекса минерализация возрастает до $3,0 \text{ г/дм}^3$ и преобладают HCO_3 - SO_4 Na-Ca воды. В северо-восточном направлении с увеличением глубины залегания девонского комплекса закономерно возрастает общая минерализация подземных вод до $15\text{--}250 \text{ г/дм}^3$, преобладает Cl Na тип вод, которые не могут быть использованы для питьевого водоснабжения. В окраинных частях бассейна питание горизонтов преимущественно инфильтрационное, а в центральных – элизионное. В южной и юго-западной частях бассейна нижние горизонты, используемые для питьевого водоснабжения, относятся к девонскому комплексу. Так, в Воронежской, Курской, Брянской, Орловской, Липецкой, Тамбовской и Псковской областях водоснабжение населения осуществляется в

том числе за счет франско-фаменских, живетских, эйфельских и даже эмских горизонтов (рис. 2).

В Калужской, Тульской, Рязанской, Смоленской, Московской и Тверской областях помимо каменноугольного комплекса также используются и девонские водоносные горизонты при наличии в них пресных подземных вод и близости зон питания водоносных горизонтов.

Каменноугольный водоносный комплекс залегает на девонском ВК, представлен полностью всеми тремя отделами. Нижняя часть комплекса (турнейско-нижневизейская) соотносится с окончанием раннегерцинского тектонического этапа и характеризуется накоплением глинисто-известковистой формации (малевская, упинская и бобринковская свиты). Начало позднегерцинского этапа характеризуется началом трансгрессии и формированием терригенных и терригенно-карбонатных формаций. Основной структурной формой являлась Волго-Камская моноклиза, в пределах которой шло активное осадконакопление. В дальнейшем установилось преимущественно карбонатное осадконакопление (верхний визе и серпухов) до начала башкирской регрессии и перерыва в осадконакоплении. Верхнекаменноугольные отложения накапливались в следующем цикле осадконакопления, начавшемся в московское время и характеризовавшемся формированием бассейна с терригенно-карбонатной седиментацией. Цикл завершился гжельско-сакмарской стадией деградации морского бассейна с образованием доломито-гипсово-ангидритовых пород лагунно-континентальной формации.

В каменноугольных отложениях надежно прослеживаются верхне- и нижнегжельские, московский, верхнесерпуховско-башкирский, верхневизейско-серпуховский, нижневизейский и турнейский водоносные горизонты, которые разделены преимущественно глинистыми водоупорами (рис. 2) [65]. Московский водоупорный горизонт является первым регионально распространенным наиболее надежным водоупором, представленным глинистой верейской серией мощностью до 35 м. Водоносные горизонты среднего и нижнего карбона распространены менее широко. Питание гжельских и московского горизонтов в основном инфильтрационное, оно происходит в местах их неглубокого залегания или выхода на поверхность. Питание остальных горизонтов смешанное. Содержащиеся воды характеризуются минерализацией $0,1\text{--}35 \text{ г/дм}^3$ и разнообразным составом – от пресных HCO_3 Ca и SO_4 Ca до соленоватых Cl Na. В осевых частях Московской синеклизы соленость в среднем составляет $10\text{--}20 \text{ г/дм}^3$, изредка достигает 190 г/дм^3 . Минерализация возрастает в направлении движения подземных вод: от зон питания к зонам разгрузки. По периферии распространения встречаются пресные HCO_3 Ca воды с минерализацией до $0,7 \text{ г/дм}^3$, которые используются для питьевого водоснабжения населения. Каменноугольные водоносные горизонты являются объектом питьевого водоснабжения и используются для бальнеологических целей во Владимирской, Вологодской, Тверской, Ленинградской, в северных районах Московской и Новгородской областях. Характерной особенностью является повышенное содержание Fe (до 10 мг/дм^3) во всех каменноугольных горизонтах (рис. 2).

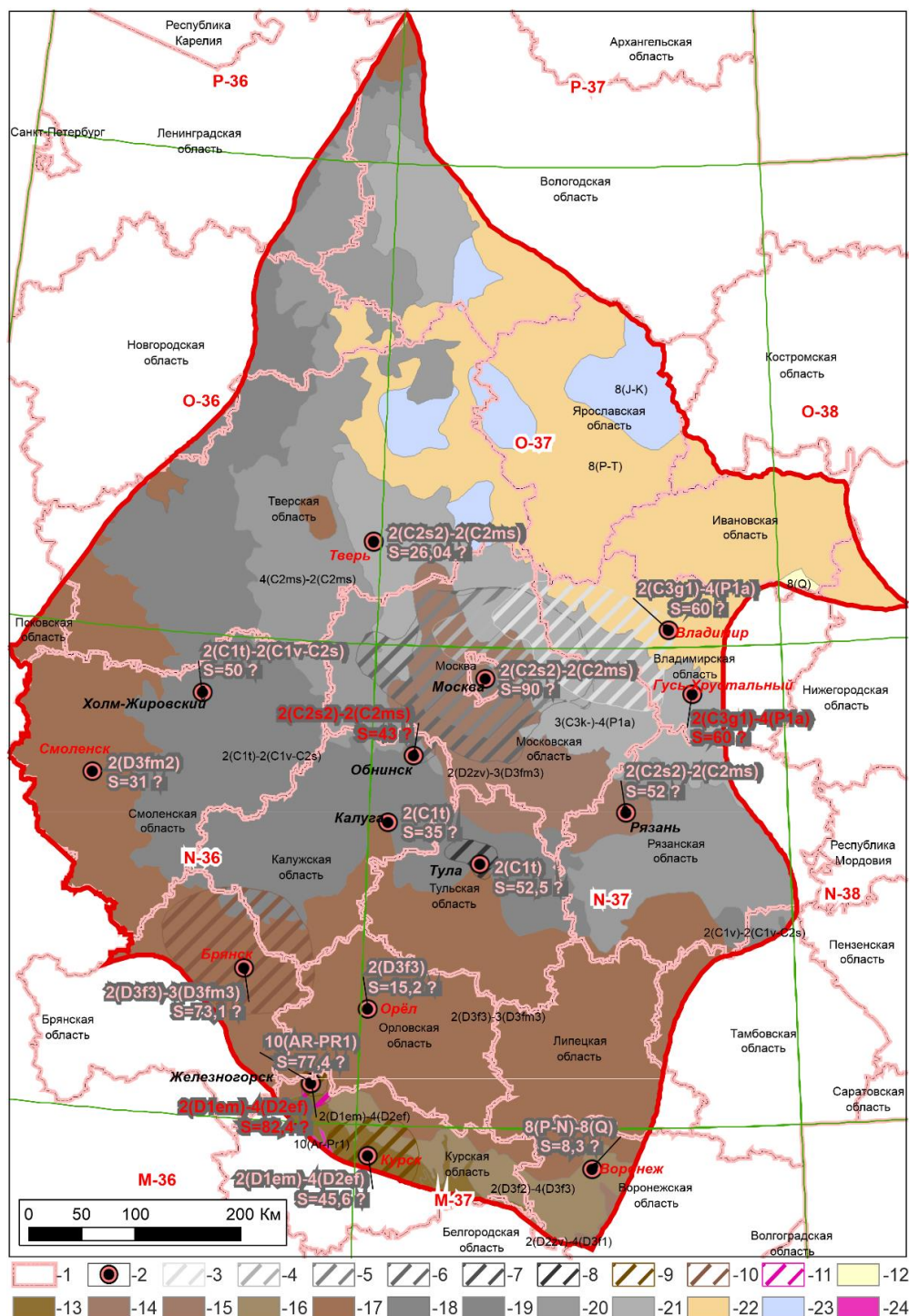


Рис. 2. Нижний водоносный горизонт, используемый для питьевых и бальнеологических целей в пределах Московского артезианского бассейна: 1 – границы субъектов РФ в пределах области изучения; 2 – центры крупных локальных депрессионных воронок; 3–11: границы региональных депрессионных воронок и их приуроченность к водоносным горизонтам: 3–2(C_{3g1})–4(P_{1a}); 4–3(C_{3k}); 5–2(C_{2ms}); 6–2(C_{2s2})–2(C_{2ms}); 7–2(C_{1t})–2(C_{1v}–C_{2s}); 8–2(C_{1t}); 9–2(D_{1em})–4(D_{2ef}); 10–2(D_{3f3}); 11–10(AR-PR₁); 12–24: нижний водоносный горизонт, используемый для питьевого водоснабжения: 12–8(Q); 13–8(J-K); 14–8(P-T); 15–3(C_{3k})–4(P_{1a}); 16–4(C_{2ms})–2(C_{2ms}); 17–2(C_{1v})–2(C_{1v}–C_{2s}); 18–2(C_{1t})–2(C_{1v}–C_{2s}); 19–2(D_{3f3})–3(D_{3fm3}); 20–2(D_{3f2})–4(D_{3f3}); 21–2(D_{2zv})–3(D_{3fm3}); 22–2(D_{2zv})–4(D_{3f1}); 23–2(D_{1em})–4(D_{2ef}); 24–10(Ar-Pr₁)

Fig. 2. Lower aquifer used for drinking purposes and spa within the Moscow artesian basin: 1 – boundaries of the Russian Federation members within the area under investigation; 2 – centers of large local depression funnels; 3–11: boundaries of regional depression funnels and their attribution to aquifers: 3–2(C_{3g1})–4(P_{1a}); 4–3(C_{3k}); 5–2(C_{2ms}); 6–2(C_{2s2})–2(C_{2ms}); 7–2(C_{1t})–2(C_{1v}–C_{2s}); 8–2(C_{1t}); 9–2(D_{1em})–4(D_{2ef}); 10–2(D_{3f3}); 11–10(AR-PR₁); 12–24: the lower aquifer used for drinking water supply: 12–8(Q); 13–8(J-K); 14–8(P-T); 15–3(C_{3k})–4(P_{1a}); 16–4(C_{2ms})–2(C_{2ms}); 17–2(C_{1v})–2(C_{1v}–C_{2s}); 18–2(C_{1t})–2(C_{1v}–C_{2s}); 19–2(D_{3f3})–3(D_{3fm3}); 20–2(D_{3f2})–4(D_{3f3}); 21–2(D_{2zv})–3(D_{3fm3}); 22–2(D_{2zv})–4(D_{3f1}); 23–2(D_{1em})–4(D_{2ef}); 24–10(Ar-Pr₁)

Пермско-триасовый водоносный комплекс распространен на северо-востоке МАБ (рис. 2). Глубина залегания изменяется от 1 до 320 м, отложения располагаются непосредственно под юрскими осадками и представлены следующими горизонтами: ассельским водоупорным, казанским водоносным, казанским относительно водоупорным и северодвинско-оленекским водоносным [65]. Водоносные горизонты сложены терригенно-карбонатно-сульфатными породами. В местах отсутствия келловейско-киммериджского водоупора для водоносных горизонтов характерно инфильтрационное питание, на остальной территории режим водонапорный. Преобладающий тип вод $\text{SO}_4 \text{ Na}$ и $\text{Cl-SO}_4 \text{ Na}$, минерализация не превышает 25 г/дм^3 . На большей части региона распространения данные подземные воды не пригодны для питья и водоснабжения, но могут быть применены для бальнеологических целей. Наибольшие дебиты фиксируются в пределах Окско-Цинского вала, где минерализация колеблется от $0,3$ до $0,8 \text{ г/дм}^3$, в составе преобладает HCO_3^- и Ca^{2+} . В Ивановской и Костромской областях распространены воды с минерализацией $0,2\text{--}0,9 \text{ г/дм}^3 \text{ Cl Na}$ состава, которые широко используются для питьевого водоснабжения, несмотря на превышение предельно-допустимых концентраций по общей жесткости и железу.

Юрско-меловой комплекс характеризуется спорадическим распространением, надежные водоупорные горизонты отсутствуют, источником питания водоносных горизонтов служат атмосферные осадки. Комплекс в границах распространения активно используется для сельскохозяйственного водоснабжения колодцами и отдельными скважинами [65]. Водообильность неравномерная, уменьшается от речных долин к водоразделам. Воды этих горизонтов преимущественно пресные с минерализацией $0,2\text{--}1,9 \text{ г/дм}^3 \text{ HCO}_3 \text{ Ca}$ состава и жесткостью до 15 мг/экв и часто высоким содержанием Fe. Туронско-кампанский водоносный горизонт является одним из основных источников централизованного водоснабжения в Брянской, Курской и Белгородской областях.

Водоносные горизонты палеоген-неогенового комплекса приурочены к эоценовым и олигоценным осадкам палеогена и к миоценовым и плиоценовым отложениям неогена, распространены фрагментарно, преимущественно в пределах бассейнов рек и погребенных речных долин [65]. Неогеновые горизонты распространены на юге МАБ, отложения имеют озерно-аллювиальный и лагунно-морской генезис, выполняют глубокие долины между реками Цной и Доном. Питание преимущественно инфильтрационное, воды в основном пресные и слабосоленоватые (от $0,1$ до $1,3 \text{ г/дм}^3$) $\text{HCO}_3 \text{ Ca}$ с превышением ПДК по общей жесткости. В ряде районов Липецкой и Воронежской областей водоносный горизонт является одним из основных источников водоснабжения и широко используется для сельскохозяйственных целей. Палеогеновые горизонты представлены рыхлыми песчаными и глинистыми осадками мелководно-морского и аллювиального генезиса. Мощность комплекса изменяется от 1 до 35 м , возрастает в южном направлении. Пита-

ние преимущественно инфильтрационное. Преобладают $\text{HCO}_3 \text{ Ca}$, Na и Mg воды с минерализацией от $0,1$ до $2,2 \text{ г/дм}^3$, с жесткостью до 34 мг/экв . Дебиты скважин незначительные, наибольшая водообильность зафиксирована на юго-западе исследуемого региона.

Четвертичный водоносный комплекс развит повсеместно, залегает на разновозрастных дочетвертичных отложениях, имеет болотный, аллювиальный и ледниковый генезис. Максимальные толщины комплекса (до 130 м) зафиксированы в северо-западной и северной части бассейна в погребенных речных долинах и областях развития ледниковых фаций, а минимальные – в южной части региона, характерны для аллювиальных и лессовых обстановок осадконакопления. Пресные воды с (до $0,9 \text{ г/дм}^3$) преимущественно $\text{HCO}_3 \text{ Ca}$ и $\text{HCO}_3 \text{ Ca-Mg}$ состава характерны для четвертичного комплекса, вблизи крупных населенных пунктов часто загрязнены, NO_3 , NH_3 и Fe. Тем не менее комплекс широко используется для сельскохозяйственных целей и питьевого водоснабжения населения.

Многолетняя активная эксплуатация подземных вод девонского и каменноугольного комплексов привела к изменению гидродинамического и гидрогеохимического состояния целого ряда водоносных горизонтов, особенно вблизи крупных населенных пунктов, где фиксируются максимальные объемы извлечения подземных вод для целей питьевого и хозяйственного водоснабжения [67]. Это выражается в формировании региональных и локальных депрессионных воронок, которые достоверно установлены на ряде территорий и приводят к ухудшению качества подземных вод, подтоку рассолов из нижележащих горизонтов и уменьшению дебитов скважин. На территории МАБ можно выделить основные районы интенсивной добычи и извлечения подземных вод, где происходят серьезные изменения гидродинамического и гидрогеохимического состояния (рис. 2): Московский, Тульский, Белгородско-Курско-Брянско-Орловский и Липецкий. На остальной территории МАБ добыча подземных вод производится не столь интенсивно, но выделяются отдельные участки в пределах крупных городов с высоким уровнем водоотбора, влияющим на состояние подземных вод.

Кроме того, природное качество подземных вод на территории Московского артезианского бассейна практически повсеместно не соответствует ПДК по ряду химических элементов, среди наиболее часто встречающихся следует отметить железо, фтор, стронций, кремний, марганец, литий, общую альфа-активность и общую жесткость. В большинстве случаев гидрогеохимические аномалии имеют природное происхождение. Техногенное воздействие отмечается в местах развития обширных депрессионных воронок, охватывающих территории Московской и Тульской областей, а также в районах крупных городов – Воронеж, Калуга, Орел, Брянск, Белгород, Курск и др., где отмечаются высокие концентрации практически для всех нормируемых показателей [67]. Кроме того, техногенное загрязнение связано с промышленными,

коммунальными, сельскохозяйственными предприятиями. Основная доля загрязнения выявлена в зоне активного водообмена, где питьевые горизонты не защищены буферными горизонтами.

Зональный прогноз Московского артезианского бассейна

Система зональных критериев, разработанная в рамках настоящего исследования, позволила оценить регионы и горизонты, наиболее перспективные для осуществления проектов CCS в пределах Московского артезианского бассейна.

Был выполнен детальный анализ структурно-тектонических особенностей, литологического и минералогического состава пород и их фильтрационно-емкостных свойств, геохимических особенностей подземных вод, гидродинамических и термобарических условий недр, кроме того, изучены природоохранные ограничения, и проведен предварительный расчет объемов возможной закачки углекислого газа в установленные структуры.

Установлено, что территория Воронежской антеклизы отличается полным отсутствием рифейского, вендского, каменноугольного, пермско-триасового комплексов и сокращёнными толщами юрско-мелового и девонского водоносных комплексов, отсутствием в их пределах ряда горизонтов, высокой фациальной неоднородностью слагающих пород по латерали. Как следствие этих особенностей, разработка и реализация проектов CCS в пределах Воронежской антеклизы невозможны, поскольку отсутствуют надежные водоупорные горизонты, способные удерживать закачиваемый углекислый газ и существующие ловушки неперспективны. Термобарические условия также не позволяют захоранивать газ в сверхкритическом состоянии.

Для осевой части Московской синеклизы характерен самый полный гидрогеологический разрез и наибольшая фациальная выдержанность отложений. В ее пределах распространено наибольшее количество водоносных горизонтов, водоупорные горизонты хорошо прослеживаются по площади и имеют выдержанные толщины. Эта территория может быть рассмотрена в качестве потенциальной для геологического размещения CO₂.

Среди рассмотренных водоносных комплексов для осуществления проектов геологического хранения CO₂ может рассматриваться только вендский, поскольку они залегают на достаточных глубинах, характеризуются давлением, близким к условно-гидростатическому, температурные аномалии в их пределах отсутствуют. Среди гидрогеохимических особенностей стоит отметить наличие в разрезе соленых вод и рассолов с минерализацией от 20 до 200 г/дм³ и обширных территорий, где эти комплексы не эксплуатируются для питьевых, технических и бальнеологических целей. Девонский комплекс в Вологодской, Калужской, Липецкой, Орловской, Рязанской, Тамбовской, Тульской областях используется для питьевого водоснабжения населения и бальнеологических целей, кроме того, вблизи крупных городов Центрального федерального округа

РФ отмечается развитие депрессионных воронок, где происходит существенное нарушение гидродинамического режима недр, в этих зонах использование девонского комплекса для целей CCS также фактически не представляется возможным. Необходимо также отметить, что в окраинных частях Московского артезианского бассейна фиксируются зоны инфильтрационного питания подземных вод, в том числе девонского комплекса, поэтому размещение CO₂ в непосредственной близости не может быть осуществлено.

В рифейских, вендских и девонских отложениях МАБ промышленных скоплений углеводородов не выявлено. Зафиксированы отдельные нефтепроявления в рифейских отложениях при бурении скважин. В скважинах 2 и 3 на Воронежской площади поднят нефтенасыщенный керн, а в скважине Даниловская 1 при испытании была получена пленка нефти, в скважине 3 – вода с водорастворенным метаном. В Рослянской скважине также получен приток воды с водорастворенным газом. В вендских отложениях притоки нефти получены из песчаников редкинской свиты на Даниловской площади. Кроме того, известны нефтепроявления на площадях Шарья, Горьковской, Марьинской, Балахнинской, Любимской, Мосоловской, Морсовской и Бутовской [66]. Следовательно, залежей углеводородов в пределах исследуемого региона не установлено, что свидетельствует, с одной стороны, об отсутствии надежных ловушек и флюидопоров в регионе, с другой – о возможности создания газовых хабов по размещению углекислого газа в водоносных горизонтах. Все выявленные перспективные участки не могут быть оценены выше средней категории.

Однако при рассмотрении потенциальных ловушек необходимо учитывать опыт организации подземных хранилищ газа (ПХГ) на территории МАБ. В процессе формирования, а также эксплуатации ПХГ имеют место быть небольшие, но стабильно существующие утечки, которые не только являются причинами экономических потерь, но и наносят прямой вред экологии. Объемы возникающих утечек зависят от фильтрационно-емкостных свойств пласта и покрышки, режима эксплуатации ПХГ и параметров (состояния) оборудования, применяемого на нем. К одним из факторов таких утечек относятся геологические, например, наличие различных тектонических разломов в пласте, неоднородно сформированный купол коллектора (присутствуют вкрапления из иных образований). В настоящее время в регионе функционируют два ПХГ: Щелковское и Калужское. Проведенный анализ геологического и тектонического строения этих территорий позволил предположить, что причинами перетоков может быть наличие как тектонических нарушений и ослабленных проницаемых зон, так и литологических песчаных окон, либо опесчанивание самих основных пластов покрышек. Все эти миграции газа являются опасными, поскольку могут вызвать неконтролируемые потери газа, образование вторичных техногенных залежей и служить причиной загрязнения водоносных горизонтов, в том числе используемых для питьевого снабжения населения.

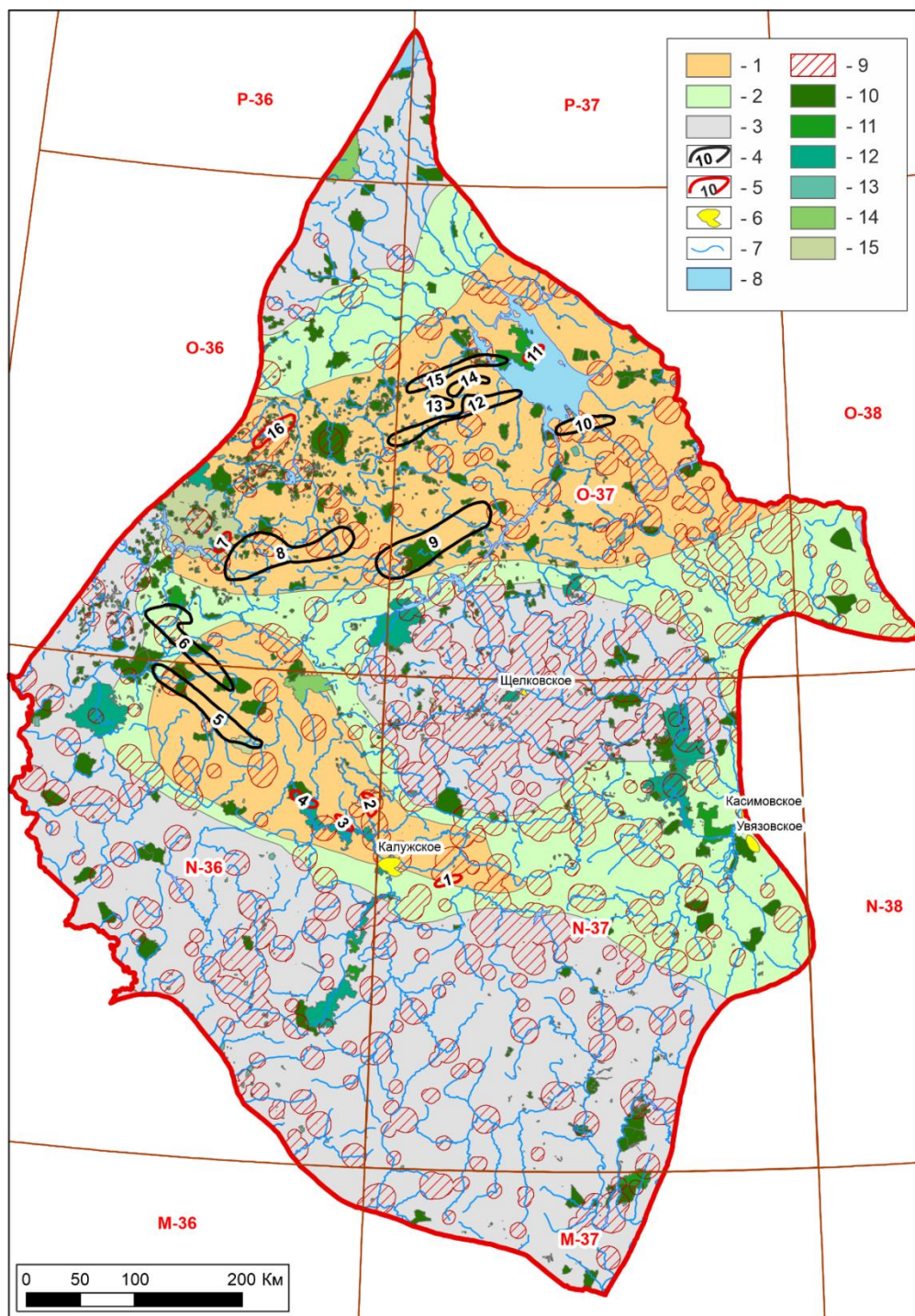


Рис. 3. Карта перспектив Московского артезианского бассейна для осуществления проектов CCS: 1–3 – зонирование по степени перспективности: 1 – среднеперспективные; 2 – низкоперспективные; 3 – бесперспективные; 4, 5 – поднятия: 4 – установленные; 5 – предполагаемые; 6 – действующие ПХГ; 7 – реки; 8 – озера; 9 – буферные зоны вокруг городов (10 км) и поселков городского типа (5 км); 10 – государственный природный заказник; 11 – государственный природный заповедник; 12 – национальный парк; 13 – памятник природы; 14 – природный парк; 15 – иные категории

Fig. 3. Map of the perspectives over the Moscow artesian basin for CCS project implementation: 1–3 – zoning with respect to the degree of perspective: 1 – with mean prospect; 2 – with low prospect; 3 – no perspective; 4, 5 – uplifts: 4 – established; 5 – assumed; 6 – operating underground gas storage facilities (GSF); 7 – rivers; 8 – lakes; 9 – buffering zones around cities (10 km) and urban-type settlements (5 km); 10 – State wildlife sanctuary; 11 – State nature reserve; 12 – national park; 13 – nature sanctuary; 14 – natural park; 15 – other categories

Таким образом, детальный анализ всех имеющихся геологических материалов на основе предложенной методики с учетом всех возможных ограничений

позволил закартировать 16 перспективных участков для осуществления проектов CCS в вендском комплексе. Все они представляют собой структурные ло-

вушки (рис. 3). Наибольшую площадь имеют 5, 6, 8 и 9 структуры (табл. 2). Толщины вендских отложений варьируются от 65 до 580 м, а эффективные – от 15 до 180 м. Незначительные пластовые температуры позволяют осуществлять размещение углекислого газа только в водорастворенном состоянии, за исключением 10 структуры, где пластовая температура достигает 40 градусов, давление – 19 МПа и закачка CO₂ может быть осуществлена в сверхкритическом состоянии.

Похожие структурные ловушки при оценке других осадочных бассейнов установлены во многих регионах мира. Так, эффективная емкость осадочных бассейнов Казахстана (Прикаспийский, Мангышлакский, Южный Торгай и Устюрт) оценивается в 539 млрд т [21]. Общая эффективная емкость ордовикской формации Majiagou в бассейне Ордос позволит захоронить от 5,98 до 109,22 млрд т. Углекислый газ будет захораниваться в сверхкритическом состоянии в карбонатных резервуарах, максимальная мощность которых достигает 800 м [68]. В австралийском проекте Gorgon хранение газа происходит в формации Duryu (песчаники) и итоговая емкость оценивается

более чем в 120 млн т [24]. В пределах осадочных бассейнов континентальной части Китая общая эффективная емкость оценивается в 1573 млрд т [69]. Емкость пласта-коллектора формации Krechba (песчаники) при реализации проекта In Sallah (Алжир) оценивалась примерно в 17 млн т, но в процессе его эксплуатации закачка была остановлена на уровне 4 млн т из-за возможного разрыва покрышки. Емкость ловушки в формации Штутгарт (песчаники) проекта Ketzin (Германия) на конец проекта составила 0,67 млн т. По оценкам, в песчаники формации Утсира мощностью 200–250 м проекта Sleipner (Норвегия) будет закачено до 600 млрд т углекислого газа, а емкость песчаного коллектора формации Тубаен мощностью 45–75 м проекта Snøhvit составляет 31–40 млн т. В рамках проекта Weyburn-Midale (Канада) планируется захоронить в карбонатный коллектор более 20 млн т углекислого газа, проект Alberta Carbon Trunk Line по оценкам вместит в себя около 2 млрд т газа. В завершившемся проекте Citronelle (США) за 4 года эксплуатации было размещено 0,15 млн т CO₂ в пределах формации Paluxu мощностью до 335 м [69].

Таблица 2. Характеристика емкости перспективного фонда структур вендского комплекса в пределах Московского артезианского бассейна

Table 2. Characterization of the capacity of promising structures in the Vendian complexes within the boundaries of the Moscow artesian basin

$M_{\text{общ}}$ M_{tot}	$M_{\text{эфф}}$ M_{eff}	S , км ² /km ²	$T_{\text{пл}}/T_{\text{res}}$, °C	$P_{\text{пл}}$, МПа P_{res} , МПа	CO ₂ раств, г/дм ³ CO _{2dis} , г/дм ³	C_{max}	$C_{0,1}$	$C_{0,1}$ с учетом ООПТ $C_{0,1}$
м/м		млрд т/бн т						
65	15	147	18	7,5	80,153	2,12	0,212	0,212
165	40	142	20	8,5	85,060	5,78	0,578	0,544
87	15	112	19	7,5	78,272	1,58	0,158	0,143
174	40	187	20	7,5	75,196	6,75	0,675	0,168
270	70	1558	22	6,0	56,855	74,40	7,440	6,199
345	90	1639	22	7,0	66,189	117,00	11,700	9,895
288	110	142	22	10,0	94,020	17,60	1,760	0,188
343	110	2782	23	10,0	91,380	336,00	33,600	32,047
419	180	2815	25	12,0	103,550	630,00	63,000	46,884
570	180	528	40	19,0	117,350	134,00	13,400	13,114
335	90	141	26	14,5	121,560	18,50	1,850	0,323
260	80	1140	28	14,0	111,720	122,00	12,200	11,651
252	65	170	26	14,0	117,430	15,60	1,560	1,510
252	70	266	26	14,0	117,390	26,20	2,620	2,620
215	70	828	25	14,0	120,520	83,80	8,38	6,894
222	80	441	23	12,0	109,340	46,30	4,63	3,418
Итого:							164,00	135,81

Примечание: $M_{\text{общ}}$ – толщины вендского комплекса, м; $M_{\text{эфф}}$ – эффективные толщины, м; S – площадь перспективных структур, км²; $T_{\text{пл}}$ – пластовая температура, °C; $P_{\text{пл}}$ – пластовое давление, МПа; $CO_2_{\text{раств}}$ – предельная растворимость углекислого газа в пластовых условиях, г/дм³; C_{max} – максимальная емкость перспективной структуры при размещении углекислого газа в водорастворенном состоянии, млрд т; $C_{0,1}$ – 10 % от максимальной емкости перспективной структуры при размещении углекислого газа в водорастворенном состоянии, млрд т; $C_{0,1}$ с учетом ООПТ – 10 % от максимальной емкости перспективной структуры с учетом площади, занятой особо охраняемыми природными территориями при размещении углекислого газа в водорастворенном состоянии, млрд т.

Note: M_{tot} – thickness values for the Vendian complex, m; M_{eff} – effective thickness values, m; S – area of promising structures, km²; T_f – formation temperature, °C; P_f – formation pressure, MPa; $CO_{2\text{ sol}}$ – limiting solubility of carbon dioxide under the in-situ (formation) conditions, g/dm³; C_{max} – maximal capacity of the promising structure with respect to carbon dioxide capture and storage in water-dissolved state, billion tons; $C_{0,1}$ – 10 % of the maximal capacity promising structure for carbon dioxide storage in water-dissolved state, billion tons.

Расчет объемов закачки углекислого газа в пределах вендского водоносного комплекса Московского артезианского бассейна позволил установить, что максимальные объемы в размере 630 млрд т могут быть утилизированы в структуру № 9 (рис. 3). При

этом около половины площади этой структуры ограничены для реализации проектов CCS из-за наличия здесь особо-охраняемых территорий и населенных пунктов. Учитывая, что растворимость CO₂ в пластовой воде на начальном этапе не превышает 10 %

[11, 70], наиболее вероятным объемом можно считать 63 млрд т для 9-й структуры и суммарно по всем прогнозируемым объектам – 164 млрд т, с учетом существующих ООПТ объем может быть снижен до 131 млрд т (табл. 2). Но, учитывая наибольшую экономическую рентабельность закачки CO₂ в сверхкритическом состоянии, наиболее перспективной является ловушка 10 с прогнозируемой емкостью 13,1 млрд т.

Заключение

В настоящем исследовании впервые предложена методика зональной оценки перспективности гидрогеологических бассейнов для осуществления проектов CCS. В процессе разработки системы критериев были проанализированы все имеющиеся литературные данные, требования и нормативные документы по утилизации как углекислого газа, так и других токсичных отходов, и строительство полигонов для организации подземных хранилищ газа, которыми руководствуются в мировой практике при проведении подобных исследований. Была разработана система оценки Артезианских бассейнов и их частей, включающая общегидрогеологические, структурно-тектонические, литологические, гидродинамические, геотермические, гидрогеохимические, природоохранные и ресурсные группы критериев, которые опираются на определённые параметры и ограничения, наиболее важные при осуществлении проектов CCS.

На основе предложенной методики было проведено ранжирование территории Московского артезианского бассейна, закартированы участки со средними, низкими перспективами и бесперспективные. В результате была составлена карта перспектив реализации проектов CCS, на которой в пределах среднестер-

спективных земель установлены геологические структуры, которые могут быть в дальнейшем оценены на локальном уровне.

Полученные результаты позволили выполнить оценку емкости шестнадцати перспективных структур, что крайне важно для дальнейшего лицензирования, проектирования геологоразведочных работ с целью реализации проектов CCS. Общая потенциальная емкость структур оценена в 164 млрд т, с учетом существующих ООПТ объем может быть снижен до 131 млрд т. При этом только одна структура по своим характеристикам позволяет вести закачку углекислого газа в сверхкритическом состоянии, остальные 15 позволяют осуществлять его закачку и геологическое хранение только в водорастворенном состоянии. Наиболее перспективной является структура № 10 с прогнозируемой емкостью 13,1 млрд т из-за наибольшей экономической рентабельности закачки CO₂ в сверхкритическом состоянии.

Также необходимо отметить, что по оценке ряда исследователей пик развертывания проектов по утилизации углекислого газа в мире прогнозируется на 2040–2060 гг. [71]. Для достижения этих целей необходимо проводить правильную оценку потенциальных геологических хранилищ, выявить экономические и экологические риски и разработать адекватную нормативно-правовую базу, учитывающую все ограничения для реализации проектов CCS, в том числе и в Российской Федерации.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Новосибирского государственного университета по программе Приоритет-2030.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Climate change 2022 mitigation of climate change working group III contribution to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change / P.R. Shukla, J. Skea, A. Reisinger, R.B. Slade, R. Fradera, M. Pathak, A.A. Khouardajie, M. Belkacemi, R. van Diemen, A. Hasija, G. Lisboa, S. Luz, J. Malley, D. McCollum, S. Some, P. Vyas. – Cambridge: Cambridge University Press, 2022. – 1991 p.
2. BP Statistical Review of World Energy // 70th ed. – 2021. URL: <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2021-full-report.pdf> (дата обращения 12.01.2023).
3. Institutional decarbonization scenarios evaluated against the Paris Agreement 1.5 °C goal / R.J. Brecha, G. Ganti, R.D. Lamboll, Z. Nicholls, B. Hare, J. Lewis, M. Meinshausen, M. Schaeffer, C.J. Smith, M.J. Gidden // Nature Communications. – 2022. – V. 13. – Article. 4304.
4. IEAGHG 2020c, Monitoring and Modelling of CO₂ Storage: The Potential for Improving the Cost-Benefit Ratio of Reducing Risk, 2020-01. URL: <https://ieaghg.org/ccs-resources/blog/new-ieaghg-technical-report-2020-01-monitoring-and-modelling-of-co2-storage-the-potential-for-improving-the-cost-benefit-ratio-of-reducing-risk> (дата обращения: 15.08.2020).
5. Baklid A., Korbol R., Owren G. Sleipner vest CO₂ disposal, CO₂ injection into a shallow underground aquifer // SPE. – 1996. – Article 36600. – P. 269–277.
6. Eiken O., Ringrose P., Hermanrud C. Lessons learned from 14 years of CCS operations: Sleipner, in Salah and Snøhvit // Energy Procedia. – 2011. – V. 4. – P. 5541–5548.
7. The In Salah CO₂ storage project: lessons learned and knowledge transfer / P.S. Ringrose, A.S. Mathieson, I.W. Wright, F. Selama, O. Hansen, R. Bissell, N. Saoula, J. Midgley // Energy Procedia. – 2013. – V. 37. – P. 6226–6236.
8. A review of developments in carbon dioxide storage / M.D. Aminu, S.A. Nabavi, C.A. Rochelle, V. Manovic // Applied Energy. – 2017. – V. 208. – P. 1389–1419.
9. Хан С.А. Анализ мировых проектов по размещению углекислого газа // Георесурсы. – 2010. – № 4 (36). – С. 55–62.
10. Geological storage of CO₂ in saline aquifers – a review of the experience from existing storage operations / K. Michael, A. Golab, V. Shulakova, J. Ennis-King, G. Allinson, S. Sharm, T. Aiken // International Journal of Greenhouse Gas Control. – 2010. – V. 4. – № 4. – P. 659–667.
11. Bachu S. Review of CO₂ storage efficiency in deep saline aquifers // International Journal of Greenhouse Gas Control. – 2015. – V. 40. – P. 188–202.
12. A decade of CO₂ injection into depleting oil fields: monitoring and research activities of the IEA GHG Weyburn-Midale CO₂ Monitoring and Storage Project / S. Whittaker, B. Rostron, C. Hawkes, C. Gardner, D. White, J. Johnson, R. Chalaturnyk, D. Seeburger // Energy Procedia. – 2011. – V. 4. – P. 6069–6076.
13. IEA GHG Weyburn CO₂ monitoring and storage project / C. Preston, M. Monea, W. Jazrawi, K. Brown, S. Whittaker, D. White, D. Law, R. Chalaturnyk, B. Rostron // Fuel Processing Technology. – 2005. – V. 86. – № 14–15. – P. 1547–1568.
14. Stevens S.H., Spector D., Riemer P. Enhanced coalbed methane recovery using CO₂ injection: worldwide resource and CO₂ sequestration potential // Proc. of the 6th International Oil & Gas Conference and Exhibition in China (IOGCEC '98). – Idaho, 1998. – P. 489–501.
15. Tang Y., Yang R., Bian X. A review of CO₂ sequestration projects and application in China // The Scientific World Journal. – 2014. – Article 014:381854.

16. A review of studies on CO₂ sequestration and caprock integrity / R. Shukla, P. Ranjith, A. Haque, X. Choi // *Fuel*. – 2010. – V. 89. – Iss. 10. – P. 2651–2664.
17. CO₂ geological storage: a review on present and future prospects / U. Zahid, Y. Lim, J. Jung, C. Han // *Korean Journal of Chemical Engineering*. – 2011. – V. 28. – P. 674–685.
18. Van der Meer L.G.H. The conditions limiting CO₂ storage in aquifers // *Energy Convers Manage.* – 1993. – V. 34. – P. 959–966.
19. The feasibility of CO₂ storage in the depleted P18-4 gas field offshore the Netherlands (the ROAD project) / R.J. Arts, V.P. Vandeweyer, C. Hofstee, M.P.D. Pluymaekers, D. Loeve, A. Kopp, W.J. Plug // *International Journal of Greenhouse Gas Control*. – 2012. – V. 11. – P. 10–20.
20. Doughty C., Freifeld B.M., Trautz R.C. Site characterization for CO₂ geologic storage and vice versa – the Frio brine pilot, Texas, USA as a case study // *Environmental Geology*. – 2008. – V. 54 (8). – P. 1635–1656.
21. Mito S., Xue Z. Post-Injection monitoring of stored CO₂ at the Nagaoka pilot site: 5 years time-lapse well logging results // *Energy Procedia*. – 2011. – V. 4. – P. 3284–3289.
22. Albany O.R., Anchorage A.K. Houston T.X., Morgantown W.V. Pittsburgh P.A. Best practices: risk management and simulation for geologic storage projects. – USA: National Energy Technology Laboratory, 2017. – 114 p.
23. Near-surface monitoring for the ZERT shallow CO₂ injection project / B.R. Strazisar, A.W. Wells, J.R. Diehl, R.W. Hammack, G.A. Veloski // *International Journal of Greenhouse Gas Control*. – 2009. – V. 3 (6). – P. 736–744.
24. Subsurface development of CO₂ disposal for the Gorgon Project / M. Flett, J. Brantjes, R. Gurton, J. McKenna, T. Tankersley, M. Trupp // *Energy Procedia*. – 2009. – V. 1. – P. 3031–3038.
25. In Salah CO₂ storage JIP: site selection, management, field development plan and monitoring overview / I. Wright, A.S. Mathieson, F. Riddiford, C. Bishop // *Energy Procedia*. – Amsterdam, The Netherlands, 2010. – P. 614–1000.
26. Potential for carbon dioxide sequestration in flood basalts / B.P. McGrail, H.T. Schaef, A.M. Ho, Yi-Ju Chien, J.J. Dooley, C.L. Davidson // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. – 2006. – V. 111. – № B12. – Article B12201.
27. Espinoza D.N., Santamarina J.C. Water-CO₂-mineral systems: interfacial tension, contact angle, and diffusion – implications to CO₂ geological storage // *Water resources research*. – 2010. – V. 46. – № 7. – Article W07537.
28. CO₂ sequestration in feldspar-rich sandstone: coupled evolution of fluid chemistry, mineral reaction rates, and hydrogeochemical properties / B.M. Tutolo, A.J. Luhmann, X.Z. Kong, M.O. Saar, W.E. Seyfried Jr // *Geochim. Cosmochim. Acta*. – 2015. – V. 160. – P. 132–154.
29. Гридин В.А. Научно-методическое обоснование тектонико-динамических и техногенных факторов формирования природных резервуаров УВ (на примере подземных хранилищ газа ЮФО): автореф. дис. ... д-ра геол.-минерал. наук. – Ставрополь, 2007. – 50 с.
30. Лебедев М.С. Совершенствование методики оценки емкостно-фильтрационных свойств коллекторов подземных хранилищ газа (на примере Северо-Ставропольского ПХГ): автореф. дисс. ... канд. геол.-минерал. наук. – Ставрополь, 2006. – 21 с.
31. Оценка возможности размещения углекислого газа в Северо-Ставропольском ПХГ / А.В. Тудвачев, П.К. Коносовский, С.А. Переверзева, В.В. Тихомиров // *Геотермальная вулканология, гидрогеология, геология нефти и газа: Материалы Всероссийской научной конференции с международным участием*. – СПб: Санкт-Петербургский государственный университет, 2020. – С. 147–150.
32. Impact of Brine/CO₂ exposure on the transport and mechanical properties of the Mt Simon sandstone / Z. Shi, L. Sun, I. Haljasmaa, W. Harbert, S. Sanguinito, M. Tkach, A. Goodman, T.T. Tsotsis, K. Jessen // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2019. – V. 177. – P. 295–305.
33. Экспериментальная оценка параметров массопереноса при закачке диоксида углерода в продуктивные пласты / В.М. Троицкий, С.Г. Рассохин, А.Ф. Соколов, А.В. Мизин, В.П. Ваньков // *Вести газовой науки*. – 2013. – № 1 (12). – С. 105–110.
34. Reservoir modeling of CO₂ plume behavior calibrated against monitoring data from Sleipner, Norway / V. Singh, A. Cavanagh, H. Hansen, B. Nazarian, M. Iding, P. Ringrose // *Society of Petroleum Engineers*. – 2010. – Paper SPE-134891-MS. – 18 p.
35. Pruess K., Spycher N. ECO2N – A fluid property module for the TOUGH2 code for studies of CO₂ storage in saline aquifers // *Energy Convers. Manage.* – 2007. – V. 48. – № 6. – P. 1761–1767.
36. Modelling carbon dioxide accumulation at Sleipner: implications for underground carbon storage / M. Bickle, A. Chadwick, H.E. Huppert, M.A. Hallworth, S. Lyle // *Earth Planet. Sc. Lett.* – 2007. – V. 255. – № 1–2. – P. 164–176.
37. Investigation of mass transfer and sorption in CO₂/brine/rock systems via in situ FT-IR / Z. Shi, S. Sanguinito, A. Goodman, K. Jessen // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. – 2020. – V. 59 (45). – P. 20181–20189.
38. Афанасьев А.А., Мельник О.Э., Цветкова Ю.Д. Моделирование фильтрации при подземном захоронении углекислого газа с применением высокопроизводительных вычислительных систем // *Вычислительная механика сплошных сред*. – 2013. – Т. 6. – № 4. – С. 420–429.
39. Борисов В.Е., Савенков Е.Б. Численное исследование метода преобуславливания Generalized Nested Factorization для промышленных задач пластовой фильтрации. – М.: ИПМ им. М.В. Келдыша, 2013. – № 12. – 18 с.
40. Варягов С.А., Зиновьев И.В. Исследования динамических процессов газовой среды подземных хранилищ газа // *Новые идеи в геологии и геохимии нефти и газа. Нефтегазовая геология. Итоги XX века*. – М.: Московский государственный университет, 2000. – С. 52–54.
41. Kelsall G. CCUS – status, barriers and potential, April 2020, IEA Clean Coal Centre. URL: <https://www.sustainable-carbon.org/report/carbon-capture-utilisation-and-storage-status-barriers-and-potential-ccc-304/> (дата обращения 15.01.2023).
42. Synchrotron-based pore-network modeling of two-phase flow in Nubian Sandstone and implications for capillary trapping of carbon dioxide / M. Hefny, C. Qin, M. Saar, A. Ebigho // *International Journal of Greenhouse Gas Control*. – 2020. – V. 103. – Article 103164.
43. McKinsey Q. Driving CO₂ emissions to zero (and beyond) with CCUS, June 2020. – 2020. URL: <https://www.mckinsey.com/business-functions/sustainability/our-insights/driving-co2-emissions-to-zero-and-beyond-with-carbon-capture-use-and-storage#accessed> (дата обращения 15.08.2020)
44. ЕЭК ООН. Пути перехода к устойчивой энергетике – ускорение энергетического перехода в регионе ЕЭК ООН. – 2020. URL: https://unece.org/fileadmin/DAM/energy/se/pdfs/CSE/Publications/Final_Report_PathwaysToSE.pdf (дата обращения 15.01.2023).
45. ЕЭК ООН. Рамочная классификация ресурсов Организации Объединенных Наций, Обновленный вариант 2019 года. – 2020. URL: https://unece.org/fileadmin/DAM/energy/se/pdfs/UNFC/publ/UNFC_ES61_Update_2019.pdf (дата обращения 15.01.2023).
46. IOGP. CCUS Projects in Europe. – 2020. URL: <https://iogpenergy.org/projects/> (дата обращения 15.01.2023).
47. IOGP. CCUS Global Projects. – 2020. URL: <https://www.iogp.org/bookstore/product/map-of-global-ccs-projects/> (дата обращения 15.01.2023).
48. CLEANER. Official website of CLEANER Project. – 2022. URL: <http://www.cleaner.eu/> (дата обращения 15.01.2023).
49. PETRA NOVA – Carbon capture and the future of coal power. NRG Energy. – 2022. URL: <https://www.nrg.com/case-studies/petra-nova.html> (дата обращения 15.01.2023).
50. COURSE50 – Technology. The Japan Iron and Steel Federation. – 2022. URL: <https://www.course50.com/en/technology/> (дата обращения 15.01.2023).
51. Kawai E., Ozawa A., Leibowicz B.D. Role of carbon capture and utilization (CCU) for decarbonization of industrial sector: a case study of Japan // *Applied Energy*. – 2022. – V. 328. – Article 120183.
52. Greig C., Uden S. The value of CCUS in transitions to net-zero emissions // *The Electricity Journal*. – 2021. – V. 34. – Iss. 7. – Article 107004.
53. Worrell E., Boyd G. Bottom-up estimates of deep decarbonization of U.S. manufacturing in 2050 // *Journal of Cleaner Production*. – 2022. – V. 330. – Article 129758.
54. Региональный прогноз перспектив размещения углекислого газа на территории Российской Федерации / Д.А. Новиков,

- Ф.Ф. Дульцев, И.И. Юрчик, Я.В. Садыкова, А.С. Деркачев, А.В. Черных, А.А. Максимова, С.В. Головин, Н.Г. Главнов, Е.А. Жуковская // Нефтяное хозяйство. – 2022. – № 3. – С. 36–42.
55. Гатальский М.А. Подземные воды и газы палеозоя Северной половины русской платформы // Труды Всесоюзного нефтяного научно-исследовательского геологоразведочного института. – Л.: ВНИГРИ, 1954. – Вып. 9. – 172 с.
56. Holloway S., Savage D. The potential for aquifer disposal of carbon dioxide in the UK // Energy Convers Manage. – 1993. – V. 34. – P. 925–932.
57. CO₂ storage uncertainty and risk assessment for the post-closure period at the Ketzin pilot site in Germany / R. Govindan, M. Babaei, A. Korre, J.-Q. Shi, S. Durucanu, B. Norden et al. // Energy Proc. – 2014. – V. 63. – P. 4758–4765.
58. Communication supporting the research on CO₂ storage at the Ketzin Pilot Site, Germany – a status report after ten years of public outreach / A. Sztybel, T. Kollersberger, F. Möller, S. Martens, A. Liebscher, M. Kühn // Energy Proc. – 2014. – V. 51. – P. 274–280.
59. СП 127.13330.2017. СНиП 2.01.28-85. Свод правил. Полигоны по обезвреживанию и размещению токсичных промышленных отходов. Основные положения по проектированию. – М.: Стандартинформ, 2017. – 26 с.
60. ГОСТ 56598-2015. Ресурсосбережение. Обращение с отходами. Общие требования к полигонам для размещения отходов. – М.: Стандартинформ, 2016. – 23 с.
61. ГОСТ 57817-2017. Подземные хранилища газа. Нормы проектирования (Переиздание). – М.: Стандартинформ, 2019. – 20 с.
62. СП 123.13330.2012. Свод правил. Подземные хранилища газа, нефти и продуктов их переработки. (Актуализированная редакция СНиП 34-02-99). – М.: Минрегион России, 2012. – 26 с.
63. Федеральный закон «Об особо охраняемых природных территориях» от 14.03.1995 (с изменениями на 26.07.2019 г.). N 33-ФЗ. – М.: Кремль, 1995. – 47 с.
64. CO₂ storage capacity estimation: Methodology and gaps / S. Bachu, D. Bonijoly, J. Bradshaw, R. Burruss, S. Holloway, N.P. Christensen, O.M. Mathiassen // Int J Greenh Gas Control. – 2007. – V. 1. – P. 430–443.
65. Садыкова (Фомина) Я.В. Гидрогеологическая стратификация Московского артезианского бассейна для целей реализации проектов CCUS // ИНТЕРЭКСПО «Геосибирь». – 2022. – Т. 3. – № 1. – С. 256–259.
66. Геология и нефтегазоносность Московской и Мезенской синеклиз / В.П. Гаврилов, П.И. Дворецкий, В.Ф. Дунаев, В.А. Пономарев, А.Н. Руднев. – М.: ОАО «Газпром», 2000. – 157 с.
67. Информационный бюллетень о состоянии недр на территории Центрального федерального округа за 2021 год. – М.: ФГБУ «Гидроспецгеология», 2022. – Вып. 27. – 163 с.
68. Evaluation of carbon dioxide storage in the deep saline layer of the Ordovician Majiagou Formation in the Ordos Basin / P. Lu, W. Liu, C. Gao, J. Zhao, Y. Bai // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. – 2021. – V. 675. – № 012058.
69. A preliminary sub-basin scale evaluation framework of site suitability for onshore aquifer-based CO₂ storage in China / N. Wei, X. Li, Y. Wang, R.T. Dahowski, C.L. Davidson, G.S. Bromhal // International Journal of Greenhouse Gas Control. – 2013. – V. 12. – P. 231–246.
70. Bachu S., Adams J.J. Sequestration of CO₂ in geological media in response to climate change: capacity of deep saline aquifers to sequester CO₂ in solution // Energy Conversion and Management. – 2003. – V. 44. – P. 3151–3175.
71. A critical review on deployment planning and risk analysis of carbon capture, utilization, and storage (CCUS) toward carbon neutrality / S. Chen, J. Liu, Q. Zhang, F. Teng, B.C. McLellan // Renewable and Sustainable Energy Review. – 2022. – V. 167. – Article 112537.

Поступила: 02.02.2023 г.

Прошла рецензирование: 24.06.2023 г.

Информация об авторах

Новиков Д.А., кандидат геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией гидрогеологии осадочных бассейнов Сибири Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН; доцент кафедры геологии месторождений нефти и газа и кафедры общей и региональной геологии Новосибирского государственного университета.

Фомина (Садыкова) Я.В., кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории гидрогеологии осадочных бассейнов Сибири

Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН; старший научный сотрудник Новосибирского государственного университета.

Юрчик И.И., кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник лаборатории гидрогеологии осадочных бассейнов Сибири Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН.

Деркачев А.С., младший научный сотрудник лаборатории гидрогеологии осадочных бассейнов Сибири Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН.

Черных А.В., научный сотрудник лаборатории гидрогеологии осадочных бассейнов Сибири Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН.

Дульцев Ф.Ф., научный сотрудник лаборатории гидрогеологии осадочных бассейнов Сибири Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН.

Максимова А.А., младший научный сотрудник лаборатории гидрогеологии осадочных бассейнов Сибири Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН; ассистент кафедры минералогии и геохимии Новосибирского государственного университета.

Никитенков А.Н., кандидат геолого-минералогических наук, доцент отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Князев А.Г., начальник отдела технологий декарбонизации АО «НИИ НПО "ЛУЧ"».

UDC 651.263:622.691.24

FIRST EXPERIENCE IN ZONAL FORECAST OVER THE MOSCOW ARTESIAN BASIN FOR IMPLEMENTATION OF CCS PROJECTS

Dmitry A. Novikov^{1,2},
NovikovDA@ipgg.sbras.ru

Yana V. Fomina (Sadykova)^{1,2},
SadykovaYV@ipgg.sbras.ru

Irina I. Yurchik¹,
YurchikII@ipgg.sbras.ru

Anton S. Derkachev¹,
a.derkachev@g.nsu.ru

Anatoliy V. Chernykh¹,
ChernykhAV@ipgg.sbras.ru

Fedor F. Dultsev¹,
DultsevFF@ipgg.sbras.ru

Anastasia A. Maksimova^{2,1},
rock.nastaya64@gmail.com

Alexey N. Nikitenkov³,
sputnik70@yandex.ru

Alexander G. Knyazev⁴,
KnyazevAG@luch-protvino.ru

¹ Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS,
3/6, Koptuyug avenue, Novosibirsk, 630090, Russia.

² Novosibirsk State University,
1, Pirogov street, Novosibirsk, 630090, Russia.

³ National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

⁴ JSC «NII NPO "LUCH"»,
5, Zheleznodorozhnaya street, Protvino, 142281, Russia.

The relevance of the investigation is caused by a substantial increase in greenhouse gas emissions all over the world, which is the most essential ecological problem causing climate change, glaciers melting, and atmospheric pollution. The most efficient method to reduce emissions is long-term carbon dioxide capture and storage in geological formations. Since the enterprises emitting carbon dioxide are highly concentrated in the European part of the Russian Federation, it is reasonable to arrange carbon dioxide storage facilities within the boundaries of the Moscow artesian basin.

The aim of the investigation was to make a zonal forecast of the outlooks for the implementation of CCS projects at the territory of the Moscow artesian basin, to reveal the geological structures that are promising for carbon dioxide storage, and evaluate the potential capacity of traps for carbon dioxide capture and storage.

The objects of the investigation are water-bearing and waterproof horizons of the lower aquifer in the Moscow artesian basin.

Methods. A system of criteria for the zonal forecast of hydrogeological structures is proposed to implement the projects aimed at geological capture and storage of carbon dioxide in deep aquifers, relying on the actual international and Russian normative basis on the burial of carbon dioxide, industrial wastewaters, toxic wastes, arrangement and monitoring of underground storage facilities. An evaluation system includes eight groups of criteria: general hydrogeological, structural-tectonic, lithological, hydrodynamic, geothermal, hydrogeochemical, environmental, and resource-related. Within each group of criteria, two and more parameters affecting evaluation of the suitability of a territory for CCS project implementation are distinguished.

Results. Evaluation of the Moscow artesian basin potential from the viewpoint of its suitability for long-term CO₂ storage has been carried out for the first time. The forecast over the proposed criteria allowed us to map the lands with different degrees of prospective viability. The structures of medium promise include 16 geological structures with the initial CO₂ capture and storage capacity of 150,6 billion tons in water-dissolved state and of 13,4 billion tons in the supercritical state. In addition, the regions of low and zero promise were distinguished. The analysis results allow us to pass to the local evaluation of the structures of medium promise in order to perform licensing and to assign the structures to the foundation of potential carbon dioxide storage facilities, which implies more detailed investigation of collectors and impermeable seal rocks, structural tectonic parameters, computer simulation of water–rock–gas interactions, and compulsory laboratory experiments.

Key words:

carbon dioxide capture and storage projects, CCS technology, procedure for determining promising objects, criteria, sedimentary basins, Russia, the Moscow artesian basin.

The investigation was carried out with financial support from Novosibirsk State University under the Priority-2030 Program.

REFERENCES

- Shukla P.R., Skea J., Reisinger A., Slade R.B., Fradera R., Pathak M., Khouradajie A.A., Belkacemi M., van Diemen R., Hasija A., Lisboa G., Luz S., Malley J., McCollum D., Some S., Vyas P. *Climate Change 2022 Mitigation of Climate Change Working Group III Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, Cambridge University Press, 2022. 1991 p.
- BP Statistical Review of World Energy. 70th ed. 2021. Available at: <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/cor->

- porate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2021-full-report.pdf (accessed 12 January 2023).
3. Brecha R.J., Ganti G., Lamboll R.D., Nicholls Z., Hare B., Lewis J., Meinshausen M., Schaeffer M., Smith C.J., Gidden M.J. Institutional decarbonization scenarios evaluated against the Paris Agreement 1.5 °C goal. *Nature Communications*, 2022, vol. 13, article. 4304.
 4. IEAGHG 2020c, *Monitoring and Modelling of CO₂ Storage: the Potential for Improving the Cost-Benefit Ratio of Reducing Risk*, 2020-01. Available at: <https://ieaghg.org/ccs-resources/blog/new-ieaghg-technical-report-2020-01-monitoring-and-modelling-of-co2-storage-the-potential-for-improving-the-cost-benefit-ratio-of-reducing-risk> (accessed 15 August 2020).
 5. Baklid A., Korbol R., Owren G. Sleipner vest CO₂ disposal, CO₂ injection into a shallow underground aquifer. *SPE*, 1996, article 36600, pp. 269–277.
 6. Eiken O., Ringrose P., Hermanrud C. Lessons learned from 14 years of CCS operations: Sleipner, in Salah and Snøhvit. *Energy Procedia*, 2011, vol. 4, pp. 5541–5548.
 7. Ringrose P.S., Mathieson A.S., Wright I.W., Selama F., Hansen O., Bissell R., Saoula N., Midgley J. The In Salah CO₂ storage project: lessons learned and knowledge transfer. *Energy Procedia*, 2013, vol. 37, pp. 6226–6236.
 8. Aminu M.D., Nabavi S.A., Rochelle C.A., Manovic V. A review of developments in carbon dioxide storage. *Applied Energy*, 2017, vol. 208, pp. 1389–1419.
 9. Khan S.A. The analysis of word projects on catching and a burial place of carbonic gas. *Georesursy*, 2010, no. 4 (36), pp. 55–62. In Rus.
 10. Michael K., Golab A., Shulakova V., Ennis-King J., Allinson G., Sharm S., Aiken T. Geological storage of CO₂ in saline aquifers – a review of the experience from existing storage operations. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2010, vol. 4, no. 4, pp. 659–667.
 11. Bachu S. Review of CO₂ storage efficiency in deep saline aquifers. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2015, vol. 40, pp. 188–202.
 12. Whittaker S., Rostron B., Hawkes C., Gardner C., White D., Johnson J., Chalaturnyk R., Seeburger D. A decade of CO₂ injection into depleting oil fields: monitoring and research activities of the IEA GHG Weyburn-Midale CO₂ Monitoring and Storage Project. *Energy Procedia*, 2011, vol. 4, pp. 6069–6076.
 13. Preston C., Monea M., Jazrawi W., Brown K., Whittaker S., White D., Law D., Chalaturnyk R., Rostron B. IEA GHG Weyburn CO₂ monitoring and storage project. *Fuel Processing Technology*, 2005, vol. 86, no. 14–15, pp. 1547–1568.
 14. Stevens S.H., Spector D., Riemer P. Enhanced coalbed methane recovery using CO₂ injection: Worldwide resource and CO₂ sequestration potential. *Proceedings of the 6th International Oil & Gas Conference and Exhibition in China (IOGCC '98)*. Idaho, 1998, pp. 489–501.
 15. Tang Y., Yang R., Bian X. A review of CO₂ sequestration projects and application in China. *The Scientific World Journal*, 2014, article 014:381854.
 16. Shukla R., Ranjith P., Haque A., Choi X. A review of studies on CO₂ sequestration and caprock integrity. *Fuel*, 2010, vol. 89, Iss. 10, pp. 2651–2664.
 17. Zahid U., Lim Y., Jung J., Han C. CO₂ geological storage: a review on present and future prospects. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 2011, vol. 28, pp. 674–685.
 18. Van der Meer L.G.H. The conditions limiting CO₂ storage in aquifers. *Energy Convers Manage*, 1993, vol. 34, pp. 959–966.
 19. Arts R.J., Vandeweyer V.P., Hofstee C., Pluymaeker M.P.D., Loeve D., Kopp A., Plug W.J. The feasibility of CO₂ storage in the depleted P18-4 gas field offshore the Netherlands (the ROAD project). *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2012, vol. 11, pp. 10–20.
 20. Doughty C., Freifeld B.M., Trautz R.C. Site characterization for CO₂ geologic storage and vice versa – the Frio brine pilot, Texas, USA as a case study. *Environmental Geology*, 2008, vol. 54 (8), pp. 1635–1656.
 21. Mito S., Xue Z. Post-Injection monitoring of stored CO₂ at the Nagaoka pilot site: 5 years time-lapse well logging results. *Energy Procedia*, 2011, vol. 4, pp. 3284–3289.
 22. Albany O.R., Anchorage A.K., Houston T.X., Morgantown W.V., Pittsburgh P.A. *Best practices: risk management and simulation for geologic storage projects*. USA, National Energy Technology Laboratory, 2017. 114 p.
 23. Strazisar B.R., Wells A.W., Diehl J.R., Hammack R.W., Veloski G.A. Near-Surface Monitoring for the ZERT Shallow CO₂ Injection Project. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2009, vol. 3 (6), pp. 736–744.
 24. Flett M., Brantjes J., Gurton R., McKenna J., Tankersley T., Trupp M. Subsurface development of CO₂ disposal for the Gorgon Project. *Energy Procedia*, 2009, vol. 1, pp. 3031–3038.
 25. Wright I., Mathieson A.S., Riddiford F., Bishop C. In Salah CO₂ storage JIP: site selection, management, field development plan and monitoring overview. *Energy Procedia*, 2010, pp. 614–1000.
 26. McGrail B.P., Schaefer H.T., Ho A.M., Chien Yi-Ju, Dooley J.J., Davidson C.L. Potential for carbon dioxide sequestration in flood basalts. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2006, vol. 111, no. B12, article B12201.
 27. Espinoza D.N., Santamarina J.C. Water-CO₂-mineral systems: interfacial tension, contact angle, and diffusion – implications to CO₂ geological storage. *Water resources research*, 2010, vol. 46, no. 7, article W07537.
 28. Tutolo B.M., Luhmann A.J., Kong X.Z., Saar M.O., Seyfried Jr W.E. CO₂ sequestration in feldspar-rich sandstone: coupled evolution of fluid chemistry, mineral reaction rates, and hydrogeochemical properties. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 2015, vol. 160, pp. 132–154.
 29. Gridin V.A. *Nauchno-metodicheskoe obosnovanie tektonodinamicheskikh i tekhnogennykh faktorov formirovaniya prirodnykh rezervuarov UV (Na primere podzemnykh khranilishch gaza YuFO)*. Avtoreferat Dis. Dokt. nauk [Scientific and methodological substantiation of tectonodynamic and technogenic factors in the formation of natural hydrocarbon reservoirs (On the example of underground gas storage facilities of the Southern Federal District). Dr. Diss. Abstract]. Stavropol, 2007. 50 p.
 30. Lebedev M.S. *Sovershenstvovanie metodiki otsenki emkostno-filtratsionnykh svoystv kollektorov podzemnykh khranilishch gaza (na primere Severo-Stavropolskogo PKhG)*. Avtoreferat Dis. Kand. nauk [Improving the methodology for assessing the capacitive-filtration properties of underground gas storage reservoirs (on the example of the Severo-Stavropolskoye UGSF). Cand. Diss. Abstract]. Stavropol, 2006. 21 p.
 31. Tudvachev A.V., Konosavsky P.K., Pereverzeva S.A., Tikhomirov V.V. Otsenka vozmozhnosti zakhoroneniya uglekislogo gaza v Severo-Stavropolskom PKhG [Assessing the Possibility of carbon dioxide storage in the Severo-Stavropol UGSF]. *Geotermalnaya vulkanologiya, gidrogeologiya, geologiya nefti i gaza. Materialy Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem* [Proceedings of the All-Russian scientific conference with international participation. Geothermal volcanology, hydrogeology, geology of oil and gas]. St. Petersburg, St. Petersburg State University, 2020. pp. 147–150.
 32. Shi Z., Sun L., Haljasmaa I., Harbert W., Sanguinito S., Tkach M., Goodman A., Tsotsisa T.T., Jessen K. Impact of Brine/CO₂ exposure on the transport and mechanical properties of the Mt Simon sandstone. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2019, vol. 177, pp. 295–305.
 33. Troitsky V.M., Rassokhin S.G., Sokolov A.F., Mizin A.V., Vankov V.P. Experimental evaluation of mass transfer parameters during injection of carbon dioxide into productive formations. *News of gas science*, 2013, no. 1 (12), pp. 105–110. In Rus.
 34. Singh V., Cavanagh A., Hansen H., Nazarian B., Iding M., Ringrose P. Reservoir modeling of CO₂ plume behavior calibrated against monitoring data from Sleipner, Norway. *Society of Petroleum Engineers*, 2010, paper SPE-134891-MS, 18 p.
 35. Pruess K., Spycher N. ECO2N – a fluid property module for the TOUGH2 code for studies of CO₂ storage in saline aquifers. *Energy Convers. Manage*, 2007, vol. 48, no. 6, pp. 1761–1767.
 36. Bickle M., Chadwick A., Huppert H.E., Hallworth M.A., Lyle S. Modelling carbon dioxide accumulation at Sleipner: implications for underground carbon storage. *Earth Planet. Sc. Lett*, 2007, vol. 255, no. 1–2, pp. 164–176.
 37. Shi Z., Sanguinito S., Goodman A., Jessen K. Investigation of mass transfer and sorption in CO₂ /Brine/Rock Systems via In Situ FT-IR. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2020, vol. 59 (45), pp. 20181–20189.
 38. Afanasiev A.A., Melnik O.E., Tsvetkova Yu.D. Modeling of filtration in underground storage of carbon dioxide using high-

- performance computing systems. *Computational Continuum Mechanics*, 2013, vol. 6, no. 4, pp. 420–429. In Rus.
39. Borisov V.E., Savenkov E.B. *Chislennoe issledovanie metoda predobsluzhivaniya Generalized Nested Factorization dlya promyshlennykh zadach plastovoy filtratsii* [Numerical study of the Generalized Nested Factorization method for industrial reservoir filtration problem]. Moscow, IPM im. M.V. Keldysh Publ., 2013. No. 12, 18 p.
 40. Varyagov S.A., Zinoviev I.V. *Issledovaniya dinamicheskikh protsessov gazovoy sredy podzemnykh khranilishch gaza* [Research of dynamic processes of the gaseous environment of underground gas storages]. *Novye idei v geologii i geokhimii nefti i gaza. Neftegazovaya geologiya. Itogi XX veka* [New ideas in geology and geochemistry of oil and gas. Oil and gas geology Results of the 20th century]. Moscow, Moscow State University Press, 2000. pp. 52–54.
 41. Kelsall G. “CCUS – status, barriers and potential”, April 2020, IEA Clean Coal Centre. Available at: <https://www.sustainable-carbon.org/report/carbon-capture-utilisation-and-storage-status-barriers-and-potential-ccc-304/> (accessed 15 January 2023).
 42. Hefny M., Qin C., Saar M., Ebigbo A. Synchrotron-based pore-network modeling of two-phase flow in Nubian Sandstone and implications for capillary trapping of carbon dioxide. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2020, vol. 103, article 103164.
 43. McKinsey Q. *Driving CO₂ emissions to zero (and beyond) with CCUS*, June 2020, 2020. Available at: <https://www.mckinsey.com/business-functions/sustainability/our-insights/driving-co2-emissions-to-zero-and-beyond-with-carbon-capture-use-and-storage#accessed> (accessed 15 August 2020).
 44. UNECE. *Pathways to sustainable energy – Accelerating the energy transition in the UNECE region*, 2020. Available at: https://unece.org/fileadmin/DAM/energy/se/pdfs/CSE/Publications/Final_Report_PathwaysToSE.pdf (accessed 15 January 2023).
 45. UNECE. *United Nations Framework Classification of Resources, 2019 Update*, 2020. Available at: https://unece.org/fileadmin/DAM/energy/se/pdfs/UNFC/publ/UNFC_ES61_Update_2019.pdf (accessed 15 January 2023).
 46. IOGP. *CCUS Projects in Europe*, 2020. Available at: <https://iogpeurope.org/projects/> (accessed 15 January 2023).
 47. IOGP. *CCUS Global Projects*, 2020. Available at: <https://www.iogp.org/bookstore/product/map-of-global-ccs-projects/> (accessed 15 January 2023).
 48. CLEANER. *Official website of CLEANER Project*, 2022. Available at: <http://www.cleanker.eu/> (accessed 15 January 2023).
 49. PETRA NOVA – carbon capture and the future of coal power. *NRG Energy*, 2022. Available at: <https://www.nrg.com/case-studies/petra-nova.html> (accessed 15 January 2023).
 50. COURSE50 – technology. *The Japan Iron and Steel Federation*, 2022. Available at: <https://www.course50.com/en/technology/> (accessed 15 January 2023).
 51. Kawai E., Ozawa A., Leibowicz B.D. Role of carbon capture and utilization (CCU) for decarbonization of industrial sector: A case study of Japan. *Applied Energy*, 2022, vol. 328, article 120183.
 52. Greig C., Uden S. The value of CCUS in transitions to net-zero emissions. *The Electricity Journal*, 2021, vol. 34, Iss. 7, article 107004.
 53. Worrell E., Boyd G. Bottom-up estimates of deep decarbonization of U.S. manufacturing in 2050. *Journal of Cleaner Production*, 2022, vol. 330, article 129758.
 54. Novikov D.A., Dultsev F.F., Yurchik I.I., Sadykova Ya.V., Derkach A.S., Chernykh A.V., Maksimova A.A., Golovin S.V., Glavnov N.G., Zhukovskaya E.A. Regionalny prognoz perspektiv zakhroneniya uglekislogo gaza na territorii Rossiyskoy Federatsii [Regional forecast for the prospects of carbon dioxide storage in the territory of the Russian Federation]. *Neftyanoe khozyaystvo*, 2022, no. 3, pp. 36–42.
 55. Gatal'skiy M.A. Podzemnye vody i gazy paleozoya Severnoy poloviny russkoy platformy. [Groundwater and gases of the Paleozoic of the Northern half of the Russian platform]. *Trudy Vsesoyuznogo neftyanogo nauchno-issledovatel'skogo geologo-razvedochnogo instituta* [Proceedings of the All-Union Oil Research Geological Prospecting Institute]. Leningrad, VNIGRI Publ., 1954. Vol. 9, 172 p.
 56. Holloway S., Savage D. The potential for aquifer disposal of carbon dioxide in the UK. *Energy Convers Manage*, 1993, vol. 34, pp. 925–932.
 57. Govindan R., Babaei M., Korre A., Shi J.-Q., Durucana S., Norden B. CO₂ storage uncertainty and risk assessment for the post-closure period at the Ketzin pilot site in Germany. *Energy Pro*, 2014, vol. 63, pp. 4758–4765.
 58. Szzybalski A., Kollersberger T., Möller F., Martens S., Liebscher A., Kühn M. Communication supporting the research on CO₂ storage at the Ketzin Pilot Site, Germany – a status report after ten years of public outreach. *Energy Proc*, 2014, vol. 51, pp. 274–280.
 59. SP 127.13330.2017. SNiP 2.01.28-85. *Svod pravil. Poligony po obezzarazhivaniyu i zakhroneniyu toksichnykh promyshlennykh otkhodov. Osnovnye polozeniya po proektirovaniyu* [Set of rules 127.13330.2017. Landfills for disinfection and disposal of toxic industrial waste. Design guidelines]. Moscow, Standartinform Publ., 2017. 26 p.
 60. GOST 56598-2015. *Resursosberezhenie. Obrashchenie s otkhodami. Obshchie trebovaniya k poligonam dlya zakhroneniya otkhodov* [State Standard 56598-2015. Resource saving. Waste management. General requirements for landfills for waste disposal]. Moscow, Standartinform Publ., 2016. 23 p.
 61. GOST 57817-2017. *Podzemnye khranilishcha gaza. Normy proektirovaniya (Pereizdanie)* [State Standard 57817-2017. Underground gas storages. Design Code (Reissue)]. Moscow, Standartinform Publ., 2019. 20 p.
 62. SP 123.13330.2012. *Svod pravil. Podzemnye khranilishcha gaza, nefi i produktov ikh pererabotki (Aktualizirovannaya redaktsiya SNiP 34-02-99)* [Set of rules 123.13330.2012. Underground storage facilities for gas, oil and products of their processing (Updated edition of SNiP 34-02-99)]. Moscow, Minregion Rossii Publ., 2012. 26 p.
 63. *Federalny zakon Ob osobo okhranyaemykh prirodnnykh territoriyakh ot 14.03.1995 (s izmeneniyami na 26.07. 2019)*. N 33-FZ [Federal Law on Specially Protected Natural Territories” dated March 14, 1995 (as amended on July 26, 2019)]. Moscow, Kreml Publ., 1995. 47 p.
 64. Bachu S., Bonijoly D., Bradshaw J., Burruss R., Holloway S., Christensen N.P. CO₂ storage capacity estimation: methodology and gaps. *Int J Greenh Gas Control*, 2007, vol. 1, pp. 430–443.
 65. Sadykova (Fomina) Ya.V. *Gidrogeologicheskaya stratifikatsiya Moskovskogo artzianskogo basseyna dlya tseley realizatsii proektov CCUS* [Hydrogeological stratification of the Moscow artesian basin for the purposes of implementing NEMS projects]. *INTEREKSPO «Geosibir»*, 2022, vol. 3, no. 1, pp. 256–259.
 66. Gavrilov V.P., Dvoretzky P.I., Dunaev V.F., Ponomarev V.A., Rudnev A.N. *Geologiya i neftegazonosnost Moskovskoy i Mezenskoy sinekliz* [Geology and oil and gas potential of the Moscow and Mezen synclises]. Moscow, OAO «Gazprom» Publ., 2000. 157 p.
 67. *Informatsionny byulleten o sostoyanii nedr na territorii Tsentralnogo federalnogo okruga za 2021 god* [Information bulletin on the state of the subsoil in the territory of the Central Federal District for 2021]. Moscow, Gidropetsgeologiya Publ., 2022. Vol. 27, 163 p.
 68. Lu P., Liu W., Gao C., Zhao J., Bai Y. Evaluation of carbon dioxide storage in the deep saline layer of the Ordovician Majiagou Formation in the Ordos Basin. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 2021, vol. 675, article 012058.
 69. Wei N., Li X., Wang Y., Dahowski R.T., Davidson C.L., Bromhal G.S. A preliminary sub-basin scale evaluation framework of site suitability for onshore aquifer-based CO₂ storage in China. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2013, vol. 12, pp. 231–246.
 70. Bachu S. Review of CO₂ storage efficiency in deep saline aquifers. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2015. vol. 40, pp. 188–202.
 71. Chen S., Liu J., Zhang Q., Teng F., McLellan B.C. A critical review on deployment planning and risk analysis of carbon capture, utilization, and storage (CCUS) toward carbon neutrality. *Renewable and Sustainable Energy Review*, 2022, vol. 167, no. 112537.

Received: 2 February 2023.

Reviewed: 24 June 2023.

Information about the authors

Dmitry A. Novikov, Cand. Sc., head of the laboratory, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences; associate professor, Novosibirsk State University.

Yana V. Fomina (Sadykova), Cand. Sc., senior researcher, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch Russian Academy of Sciences; senior researcher, Novosibirsk State University.

Irina I. Yurchik, Cand. Sc., researcher, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences.

Anton S. Derkachev, junior researcher, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences.

Anatoliy V. Chernykh, researcher, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences.

Fedor F. Dultsev, researcher, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences.

Anastasia A. Maksimova, assistant, Novosibirsk State University; junior researcher, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences.

Alexey N. Nikitenkov, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Alexander G. Knyazev, head of CO₂ sequestration department, JSC «NII NPO "LUCH"».

УДК 69.058.8

ОПЫТ СОЗДАНИЯ СТЕНДОВ ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ОТВЕТСТВЕННЫХ ОБЪЕКТОВ НЕФТЕГАЗОВОГО КОМПЛЕКСА

Однокопылов Георгий Иванович¹,
OGLz@yandex.ru

Саркисов Дмитрий Юрьевич²,
Milandd@yandex.ru

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

² Томский государственный архитектурно-строительный университет,
Россия, г. Томск, пл. Соляная, 2.

Актуальность работы обусловлена возросшей вероятностью воздействия на строительные конструкции ответственных зданий и сооружений объектов нефтегазового комплекса кратковременных ударных и взрывных динамических нагрузок вследствие террористических актов и других чрезвычайных ситуаций. Примером таких воздействий может служить недавний террористический акт на газопроводах «Северный поток». В связи с большим количеством параметров, влияющих на физический процесс деформирования конструкций при таком виде воздействия, в настоящее время неотъемлемой частью научных изысканий в этой области являются экспериментальные исследования. Особенно актуальны такие исследования для железобетонных конструкций, которые, с одной стороны, очень широко применяются в строительстве, а с другой, обладают сложным нелинейным характером деформирования. Для проведения экспериментальных исследований необходимо проектировать и реализовывать специализированные стенды, при помощи которых можно создать кратковременное динамическое воздействие на конструкцию. Выполненный обзор литературных данных показал, что наиболее часто для проведения таких исследований создаются испытательные стенды на базе копровых установок. В таких установках для разрушения конструкций используется энергия падающего груза. Из вышесказанного следует, что проектирование и совершенствование стендов для исследований железобетонных конструкций на действие кратковременных динамических нагрузок является актуальной задачей, имеющей практическую значимость.

Цель: описание конструкций испытательных стендов, созданных на базе копровой установки в лаборатории кафедры железобетонных и каменных конструкций Томского государственного архитектурно-строительного университета, выявление их основных преимуществ и указание недостатков; формулировка дальнейших путей развития в области проектирования и реализации таких установок.

Методы: теоретический анализ литературы и интернет-источников, моделирование, экспериментальные исследования.

Результаты. Спроектированы и реализованы различные модификации испытательных стендов на базе копровой установки для исследований железобетонных конструкций. Показаны основные преимущества и недостатки таких установок, сформулированы дальнейшие пути их развития.

Ключевые слова:

Испытательный стенд, копровая установка, форма сигнала нагрузки, кратковременное динамическое нагружение, железобетон, экспериментальные исследования.

Актуальность исследования

Известно, что важной народно-хозяйственной задачей является обеспечение промышленной безопасности опасных производственных объектов (ОПО). Аварии и чрезвычайные ситуации на таких объектах могут приводить к значительным материальным потерям, а также возможной гибели людей. Кроме того, при авариях на крупных промышленных объектах возникают репутационные потери для государства, а также косвенные потери, связанные, например, с необеспечением населения и объектов экономики необходимыми ресурсами или разрушением логистических цепочек при производстве сложных товаров.

Статус опасных производственных объектов, а также их описание закреплены в Федеральном законе № 116 ФЗ «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» от 21.07.1997 г. (рис. 1). В приложении 1 ФЗ № 116 приведен перечень объектов, отнесенных к ОПО. К ним относятся, например, объекты, на которых получают, используются, обра-

зуются, хранятся, транспортируются, уничтожаются в указанных количествах опасные вещества следующих видов: воспламеняющиеся, окисляющие, горючие, взрывчатые, токсичные и высокотоксичные вещества, а также вещества, представляющие опасность для окружающей среды. Таким образом, отдельные здания и сооружения нефтегазового комплекса являются ОПО, например, стационарные платформы цеха газонефтеперерабатывающих заводов и др.

В настоящее время возросла опасность осуществления на таких объектах террористических актов, которые приводят к воздействию на строительные конструкции кратковременных динамических нагрузок в виде ударов или взрывов. Примером такого террористического акта может служить подрыв газопроводов «Северный поток». Характерными особенностями такого вида нагрузок являются: резкое нарастание, относительно короткий период действия, высокая интенсивность, а в самих конструкциях наблюдается волновой характер распространения напряжений.

Некоторые факторы, обуславливающие сложность кратковременных динамических нагрузок [1–4], приведены ниже:

- различная форма приложения (распределенное или сосредоточенное) – это может быть давление фронта волны при взрыве, распределенное по всей площади конструкции с ее общим деформированием, или точечное попадание снаряда с прониканием, образованием воронки, пробитием;
- различное направление воздействия – нормальное приложение нагрузки на конструкцию (падение груза) или под произвольным углом (попадание снаряда);
- зависимость от формы и характеристик воздействующего элемента (формы ударника, его способности деформироваться и поглощать энергию);
- широкой диапазон возможных скоростей воздействия нагрузки, например, при дефлаграционном горении газо-пылевоздушных смесей скорость

распространения фронта пламени составляет обычно несколько метров или несколько десятков метров в секунду, а при детонационном горении скорость распространения фронта в газовых смесях может достигать 1000–3500 м/с, а в твердых и жидких веществах до 9000 м/с; скорость аварийного падения груза может составлять несколько метров в секунду, а скорость падения самолета достигает 250–300 м/с; начальная скорость удара авиабомбы достигает 250 м/с, а снаряда 1000 м/с;

- различный характер действия во времени, например, различают кратковременный импульс и мгновенный импульс. При действии на конструкцию кратковременного импульса необходимо учитывать величину импульса, его форму и продолжительность действия, а при действии мгновенного импульса учитывают только его величину;
- разные формы импульса: прямоугольная, треугольная, параболическая.



Рис. 1. Перечень относящихся к ОПО объектов

Fig. 1. List of objects related to the dangerous industrial objects

Поведение строительных конструкций при действии кратковременных динамических нагрузок во многом зависит от материала их изготовления, при этом наиболее часто встречающимися материалами являются сталь и железобетон. Работа материалов конструкций при кратковременных динамических нагрузках отличается от работы тех же материалов при статических воздействиях. Наиболее сильно это проявляется для бетона, как для материала, обладающего значительной физической нелинейностью. В дальнейшем речь в работе пойдет в основном о железобетонных конструкциях.

Сложность теоретического описания работы железобетона при действии кратковременной динамической нагрузки, особенно на стадии разрушения, обусловлена в том числе следующими факторами [5–28]:

- влиянием скорости нагружения на свойства материала, при возрастании скорости повышается предел прочности и уменьшаются деформации;
- запаздыванием пластических деформаций при динамическом нагружении;

- влиянием качества цементного камня, его плотности, свойств заполнителей (крупность, объем содержания), прочности сцепления в контактной зоне между цементным камнем и заполнителем, водоцементного отношения и т. д.;
- влиянием неоднородности структуры и наличия микродефектов, которые в большей степени снижают динамическую прочность чем статическую;
- влиянием водонасыщения, например, в водонасыщенном состоянии динамическая прочность бетона возрастает;
- различным временем задержки разрушения, в течение которого бетон будет выдерживать перегрузку.

Сложность процессов и недостаточно изученное напряженно-деформированное состояние материала приводит к необходимости проведения экспериментальных исследований для дальнейшего уточнения данных теоретических положений, верификации расчетных моделей, набора данных для статистической обработки, исключения или уточнения эмпирических коэффициентов и т. д.

Из вышесказанного следует, что испытания (экспериментальные исследования) в настоящее время должны являться неотъемлемой частью выполнения научных и практических работ в области сопротивления железобетонных конструкций кратковременным динамическим нагрузкам.

В то же время исследователи имеют ограничения в плане наличия необходимого оборудования и методов его использования (возможность установки и применения, недопущения повреждений вследствие высокой стоимости, воспроизводимости полученных данных и др.).

Исходя из этого возникают сложности, связанные с разноплановостью применяемых для испытаний стендов и измерительного оборудования.

Целью работы является описание конструкций испытательных стендов, созданных на базе копровой установки в лаборатории кафедры железобетонных и каменных конструкций Томского государственного архитектурно-строительного университета, выявление их основных преимуществ и указание недостатков, формулировка дальнейших путей развития в области проектирования и реализации таких установок.

Краткий обзор экспериментальных стендов

Обзор литературных данных показывает, что при экспериментальных исследованиях строительных конструкций и материалов на действие кратковременных динамических нагрузок в основном используется несколько типов испытательных стендов. Можно выделить пневматические установки, огнестрельные или взрывные, а также ударные.

В пневматических установках воздействие на образец осуществляется за счет энергии сжатого, сжиженного или отвержденного воздуха или газа. Данная энергия приводит в движение некий снаряд (ударник), который воздействует на мишень (экспериментальный образец). Для исследования свойств материалов широко используется стержневая система Кольского также известная, как Split-Hopkinson Pressure Bar [29–31]. Схема одной из таких установок [32] приведена на рис. 2. Существуют различные модификации таких установок, но предназначены они в основном для изучения свойств материалов, а не конструкций, размеры экспериментальных образцов достаточно малы. Также предполагается, что деформации в образце распространяются равномерно.

Также к пневматическим установкам можно отнести различного рода газовые пушки, из которых выстреливают снарядом по железобетонным образцам или конструкциям [33–36]. Скорость снаряда при соприкосновении с образцом может достигать 100, 200, 400 м/с и выше. Примером такой установки может служить газовая пушка в Пекинском технологическом университете [37] (рис. 3).

Относительно большие размеры таких пневматических испытательных стендов снижают возможности их модификации, перемещения, наклона, и они в основном предназначены не для исследования каких-то конкретных конструкций, а больше для условных мишеней из заданного материала. Также дополнительную сложность и повышенную опасность при испытаниях обуславливают работа с сжатым воздухом или газом и высокие скорости полета снарядов.

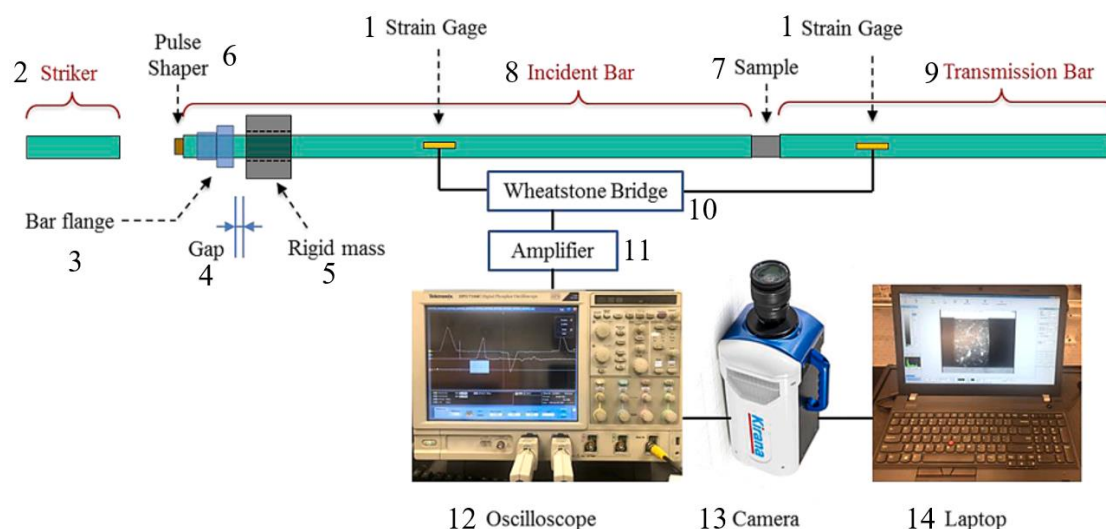


Рис. 2. Схема модифицированной установки компрессионного стержня Кольского: 1 – тензометрический датчик; 2 – ударник; 3 – фланец; 4 – зазор; 5 – жесткая масса; 6 – формирователь импульсов; 7 – образец; 8 – падающий стержень; 9 – передающий стержень; 10 – мост Уитстоуна; 11 – усилитель; 12 – осциллограф; 13 – камера; 14 – ноутбук

Fig. 2. Scheme of a modified installation of the Kolskiy compression rod: 1 – strain gage; 2 – striker; 3 – bar flange; 4 – gap; 5 – rigid mass; 6 – puls shaper; 7 – sample; 8 – incident bar; 9 – transmission bar; 10 – Wheatstone Bridge; 11 – amplifier; 12 – oscilloscope; 13 – camera; 14 – laptop

К следующему типу испытательных установок можно отнести огнестрельные и взрывные. В огнестрельных и взрывных установках воздействие на

экспериментальные образцы осуществляется в основном за счет воспламенения (высокого нагрева) пороховых газов или других взрывчатых веществ.

В огнестрельных стендах на опытный образец воздействуют различной формы снаряды, выпускаемые из разных баллистических пушек [38]. Такие исследования проведены, например, в работах [39, 40],

где испытывались простые бетонные образцы цилиндрической формы диаметром 0,8 м и длиной 0,5 м (рис. 4). Скорости полета снарядов при таких испытаниях составляли от 500 до 1700 м/с.

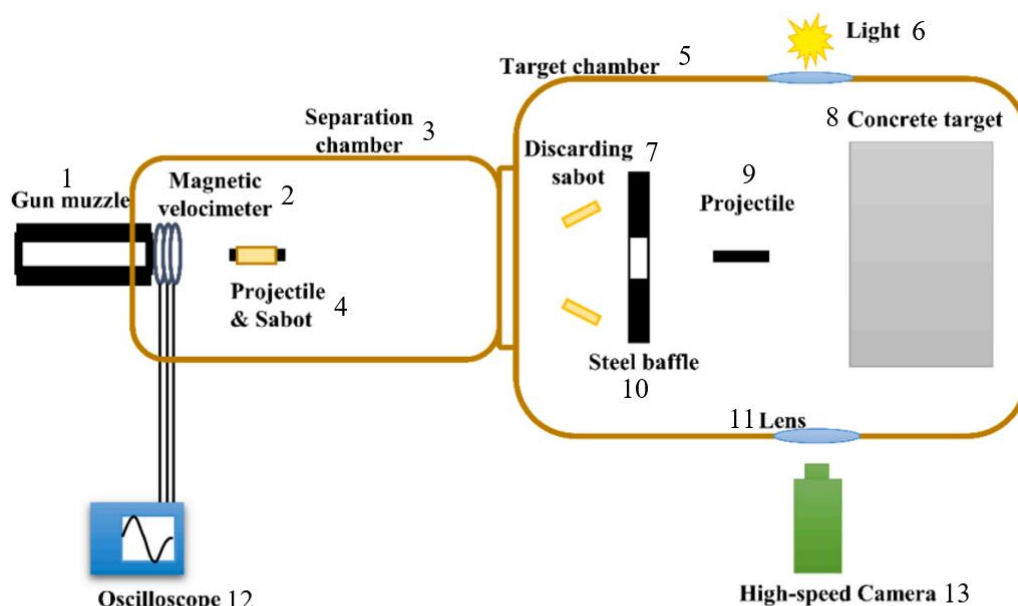


Рис. 3. Схема экспериментальной установки: 1 – дуло; 2 – магнитный велосиметр; 3 – разделительная камера; 4 – снаряд и оболочка; 5 – камера цели; 6 – источник света; 7 – отбрасывание оболочки; 8 – бетонная цель; 9 – снаряд; 10 – стальная заслонка; 11 – линза; 12 – осциллограф; 13 – высокоскоростная камера

Fig. 3. Scheme of the experimental installation: 1 – gun muzzle; 2 – magnetic velocimeter; 3 – separation chamber; 4 – projectile and sabot; 5 – target chamber; 6 – light; 7 – discarding sabot; 8 – concrete target; 9 – projectile; 10 – steel baffle; 11 – lens; 12 – oscilloscope; 13 – high speed camera



Рис. 4. Испытания при помощи огнестрельных орудий

Fig. 4. Tests with firearms

Взрывные испытания проводятся в основном по схеме детонации заряда взрывчатого вещества, расположенного на некотором расстоянии от экспериментальной конструкции [41–44]. При таких испытаниях экспериментальный образец закрепляют на специальных опорах, исключающих его передвижение в этих местах. Заряд подвешивают в необходимом положении на заданном расстоянии

от образца. Расставляют необходимое оборудование и после этого производят детонацию заряда. Примером таких исследований может служить работа [45] (рис. 5), где испытывалась броневая стальная пластина размерами 1,5×1,5 м на действие взрыва. Мощность заряда составляла 2 кг в тротиловом эквиваленте, размещенном на высоте 300 мм непосредственно над центром пластины.



Рис. 5. Испытания стальной пластины на действие воздушного взрыва: 1 – заряд 2 кг тротила; 2 – верхняя крепежная пластина; 3 – бронева стальная пластина (экспериментальный образец); 4 – зажимная рама

Fig. 5. Testing of a steel plate for the effect of air explosion: 1 – 2 kg TNT; 2 – top fixing plate; 3 – armor steel plate; 4 – clamp frame

Такие испытания только условно можно назвать стендовыми, так как чаще они выполняются на специальных полигонах. Ограничения накладывают воздействия окружающей среды, невозможность использовать стационарное оборудование, а также высокие риски для безопасности людей при проведении такого рода испытаний.

Третий основной тип установок – стенды, сконструированные на базе копра. В них воздействие на экспериментальный образец осуществляется за счет энергии перемещения груза. Такие экспериментальные стенды создают в основном в лабораторных условиях, они бывают трех основных видов: ротационные, маятниковые и самые распространенные с падающим грузом.

Пример ротационного копра приведен на рис. 6 [46], его действие основано на ударе по экспериментальному образцу специального ножа (бойка), закрепленного на массивном диске. Линейная скорость ножа здесь может составлять до 125 м/с.

Примером маятникового копра может служить установка, описанная в работах [47, 48], где исследовался динамический ответ на воздействие железобетонных подпорных стен. В таких стендах подвешенный груз отклоняется от вертикального положения в сторону и затем отпускается. Стремясь вернуться в положение равновесия груз наносит удар по экспери-

ментальному образцу. Масса и форма груза при этом могут быть различные (рис. 7).

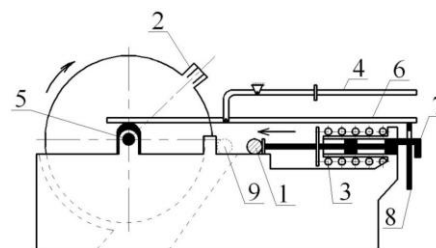


Рис. 6. Ротационный копер Г.И. Погодина-Алексеева: 1 – экспериментальный образец; 2 – нож; 3 – пружина; 4 – рукоятка; 5 – кулак; 6 – левый конец рычага; 7 – стержень; 8 – фиксирующая защелка

Fig. 6. Rotary coper of G.I. Pogodin-Alekseev: 1 – experimental sample; 2 – knife; 3 – spring; 4 – handle; 5 – fist; 6 – left end of lever; 7 – rod; 8 – locking latch

Копер с падающим грузом приведен, например, в работе [49] и на рис. 8. Здесь воздействие на конструкцию осуществляется при помощи энергии падающего груза, который свободно падает на экспериментальный образец вдоль направляющих. Также подобные стенды можно встретить в работах [50–53].



Рис. 7. Маятниковый копер и варианты ударяющего груза

Fig. 7. Pendulum coper and variants of the striking load

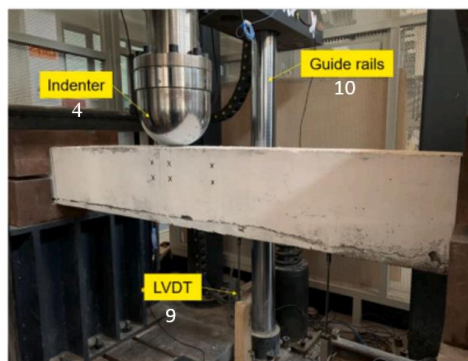
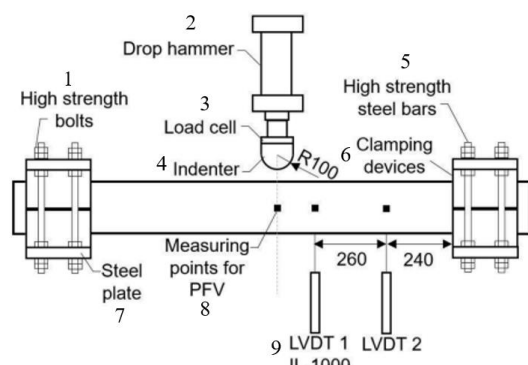


Рис. 8. Копровая установка: 1 – высокопрочные болты; 2 – ударный молот; 3 – датчик силы; 4 – твердый наконечник; 5 – высокопрочная шпилька; 6 – зажимное устройство; 7 – стальная пластина; 8 – место фиксации высокоскоростной видеокамеры; 9 – датчики перемещений; 10 – направляющий рельс

Fig. 8. Drop-weight stand: 1 – high strength bolts; 2 – drop hammer; 3 – load cell; 4 – indenter; 5 – high strength steel bars; 6 – clamping devices; 7 – steel plate; 8 – measuring points for PFV; 9 – LVDT; 10 – guide rails

Анализ конструктивных решений экспериментальных установок, применяющихся в мировой практике для изучения действия кратковременных динамических нагрузок, показал, что наибольшей простотой создания, а также вариативностью исследования различных конструкций обладают копровые установки с падающим грузом.

Собственный опыт применения экспериментальных стенов

Сотрудники кафедры железобетонных и каменных конструкций Томского государственного архитектурно-строительного университета (ТГАСУ) имеют многолетний опыт разработки различных модификаций стенов для испытания железобетонных конструкций на действие кратковременных динамических нагрузок, которые реализуются на базе копровой установки.

Жестким основанием для установки служит силовой пол с ручьями для крепления направляющих штанг и опор элементов. Базой всех стенов является копровая установка, которая включает две направляющих трубы, поперечную траверсу с закрепленной лебедкой и груз. Груз состоит из двух крайних пластин со сферическими вырезами для перемещения вдоль направляющих и набора пластин для регулировки массы груза. Все пластины имеют отверстия для пропуска стяжных болтов. В качестве узла закрепления и отпуска груза используется устройство по типу авиационного бомбосбрасывателя.

Опоры для экспериментальных образцов модифицируются в зависимости от типа испытания и крепятся к силовому полу. Они в общем виде представляют собой металлические жесткие элементы и содержат устройства для измерения опорных реакций.

На опоры устанавливается экспериментальный образец, а сверху через распределительные элементы устанавливается силоизмеритель.

В качестве стандартного набора датчиков используются тензорезисторы, акселерометры и прогибомеры (в различных конфигурациях). Все датчики подключаются к регистрирующей системе. Для одновре-

менного запуска всех приборов и отпуска груза спроектирован узел синхронизации.

Все модификации стенов также содержат системы страховки для обеспечения безопасности людей и сохранности датчиков.

Несколько модификаций стенов приведены на рис. 9. На все стенов и вспомогательные устройства получены патенты РФ на изобретения или полезные модели [54–63].

Опыт проектирования и использования стенов на базе копровой установки позволил выделить следующие преимущества и недостатки таких решений.

К преимуществам таких установок можно отнести:

- простое конструктивное решение (две направляющих, падающий груз, система его подъема и отпуска, силовое основание, опоры для опирания образцов);
- высокая вариативность создания различных видов напряженно-деформированного состояния в образцах (центральное и внецентренное сжатие, центральное и внецентренное растяжение, изгиб, косой изгиб, кручение);
- возможность испытания широкого класса конструкций (балки с разрушением по нормальным и наклонным сечениям, колонны, узлы сопряжения колонн и ригелей и др.);
- широкий диапазон создаваемых нагрузок за счет различной высоты подъема груза и его массы;
- возможность распределения нагрузки по образцу через дополнительные элементы;
- простой способ увеличения массы груза путем добавления дополнительных пластин или блоков;
- малая площадь, занимаемая такой установкой, в лаборатории;
- простые устройства опор (чаще не требуется ограничение горизонтальных смещений, а вся нагрузка уходит в стационарный силовой пол или фундамент);
- отсутствие потребления электрической энергии (в случае механических узлов подъема груза и замыкания системы подвески груза);

- хороший обзор экспериментального образца и процесса его работы под нагрузкой (нет острой необходимости в наличии защитных кожухов);
- широкие возможности по установке необходимого оборудования и датчиков;
- относительная безопасность при испытаниях (отсутствие взрыва, воспламенения, значительной скорости и диапазона разлета осколков и т. д.);
- возможность создать относительно простую систему страховки;
- отсутствие отходов (кроме экспериментального образца);
- относительно малая себестоимость стенда и малая стоимость проведения эксперимента (нет необходимости восполнять ресурсы – заряды взрывчатого вещества, снаряды, газ, сжатый воздух и др.).

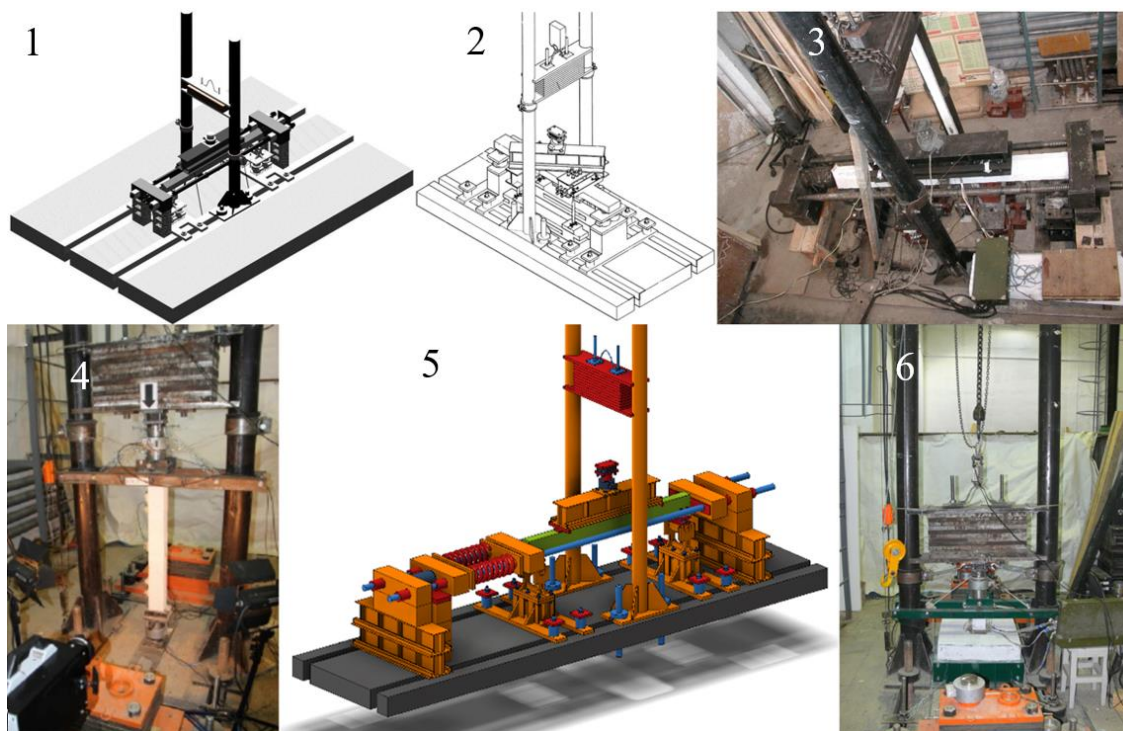


Рис. 9. Экспериментальные стенды на базе копровой установки: 1 – косоое внецентренное кратковременное динамическое растяжение; 2 – кратковременное динамическое кручение с изгибом; 3 – косоое внецентренное кратковременное динамическое сжатие; 4 – кратковременное динамическое сжатие колонн; 5 – продольное статическое обжатие с кратковременным динамическим поперечным воздействием; 6 – испытания на продавливание при действии кратковременной динамической нагрузки

Fig. 9. Experimental installations based on a drop-weight stand: 1 – oblique off-center short-term dynamic stretching; 2 – short-term dynamic torsion with bending; 3 – oblique off-center short-term dynamic compression; 4 – short-term dynamic compression of columns; 5 – longitudinal static compression with short-term dynamic transverse action; 6 – punching tests under the action of short-term dynamic load

В качестве недостатков можно отметить следующее:

- невозможность создать условия с высокими скоростями нагружения;
- возможность создания в основном только вертикальной динамической нагрузки;
- ограничения по габаритам экспериментальных образцов (расстояния между направляющими копра, параметры силового пола);
- сложности с созданием равномерно-распределенных нагрузок.

Одной из проблем, требующих более глубокого изучения, при применении таких стендов является зависимость формы сигнала нагрузки от различных параметров. Проявляется это при испытаниях конструкций в том, что наблюдается несколько характерных форм сигнала (рис. 10):

- однократный непродолжительный всплеск сигнала нагрузки;
- несколько непродолжительных всплесков сигнала нагрузки (отскоки груза);
- сигнал с одним пиком и длительным плавным затуханием;
- сигнал с основным пиком и плато.

При этом временные показатели в полученных графиках варьируются в достаточно широких диапазонах. Например, для проводимых в лаборатории кафедры железобетонных и каменных конструкций испытаний время прохождения первого всплеска в среднем варьировалось от 10 до 15 мс, время прохождения плато составляло 20...40 мс. Общее время прохождения сигнала нагрузки в среднем составляло от 30 до 60 мс. Некоторые другие показатели по параметрам графиков нагрузки приведены в работах [64, 65]. Указанные цифры и диапазоны получены при ис-

пытаниях различных конструкций с разными видами напряженно-деформированного состояния (сжатие, изгиб, продавливание).

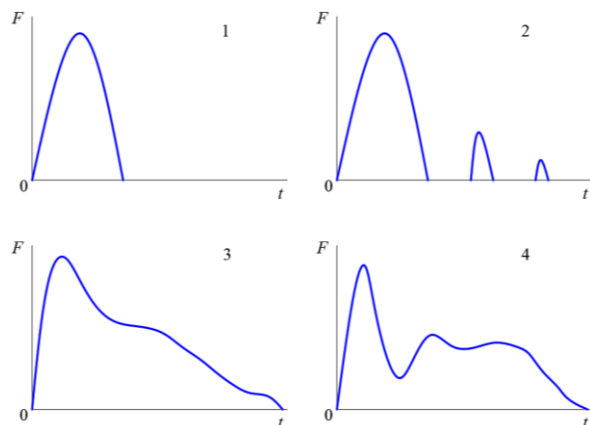


Рис. 10. Характерные формы сигнала при испытаниях железобетонных конструкций на копровой установке: 1 – однократный непродолжительный всплеск сигнала нагрузки; 2 – несколько непродолжительных всплесков сигнала нагрузки; 3 – сигнал с одним пиком и длительным плавным затуханием; 4 – сигнал с основным пиком и плато

Fig. 10. Characteristic waveforms when testing reinforced concrete structures on a drop-weight stand: 1 – a single short burst of the load signal; 2 – several short bursts of the load signal; 3 – a signal with a single peak and a long smooth attenuation; 4 – a signal with a main peak and a plateau

В целом можно отметить, что при высокой жесткости и несущей способности экспериментального образца график сигнала нагрузки меньше растянут по времени, возможно появление повторных всплесков (теоретические отскоки и повторные падения грузов). В случае же имеющейся податливости (меньшей жесткости) график сигнала более растянут по времени и на графике может наблюдаться плато.

Таким образом, характер формы сигнала зависит от динамических жесткостных параметров системы: испытательный стенд – экспериментальный образец. Здесь в качестве некоторых влияющих параметров можно выделить:

- соотношения весов и жесткостей падающего груза и экспериментального образца;
- соотношение высоты образца и высоты падения груза;
- форма ударника падающего груза;

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Попов Н.Н., Расторгуев Б.С. Вопросы расчета и конструирования специальных сооружений. – М.: Стройиздат, 1980. – 190 с.
2. Попов Н.Н., Расторгуев Б.С. Расчет железобетонных конструкций на действие кратковременных динамических нагрузок. – М.: Стройиздат, 1964. – 151 с.
3. Плевков В.С. Динамическая прочность бетона и арматуры железобетонных конструкций. – Томск: Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 1996. – 64 с.

- наличие различного рода прокладок между грузом и образцом.

Для получения информации о влиянии данных параметров на форму сигнала необходимо проведение специальных калибровочных экспериментальных исследований, в которых они будут варьироваться в необходимых диапазонах.

Целью таких исследований должно стать получение данных для модернизации и создания стендов с достоверно прогнозируемой и моделируемой формой сигнала нагрузки при проведении испытаний.

В таких стендах силовое воздействие может быть сформировано на основе применения электромеханических устройств. При этом образование необходимой формы сигнала нагрузки в процессе испытания предлагается производить путем применения системы управления электроприводом с заданными алгоритмами. Формирование сигнала нагрузки должно происходить в реальном времени с корректировкой давления механической части установки на экспериментальный образец через прописанные алгоритмы управления.

Только такая реализация испытательного стенда позволит проводить экспериментальные исследования с достоверным воспроизведением на строительные конструкции реальных динамических нагрузок, что в последующем позволит правильно их учитывать при проектировании и избежать гибели людей при возникновении чрезвычайных ситуаций на объектах нефтегазового комплекса класса ОПО.

Выводы

1. Проанализированы особенности кратковременных динамических нагрузок и строительных материалов для объектов нефтегазового комплекса, показана необходимость проведения экспериментальных исследований, выполнен обзор испытательных стендов, применяемых в мировой практике.
2. Приведено описание стендов, созданных на базе копровой установки в лаборатории кафедры железобетонных и каменных конструкций ТГАСУ, выявлены их основные преимущества и указаны недостатки. Сформулированы дальнейшие пути развития в области проектирования и реализации таких стендов.
3. Предложено создание стендов на основе электромеханических устройств с формированием сигнала нагрузки через алгоритмы управления электроприводом.

Работа выполнена при поддержке госзадания Министерства науки и высшего образования РФ FEMN-2022-0004.

4. Кумпяк О.Г., Галаяудинов З.Р., Кокорин Д.Н. Прочность и деформативность железобетонных конструкций на податливых опорах при кратковременном динамическом нагружении: монография. – Томск: Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2016. – 272 с.
5. Calculation of reinforced-concrete frame strength under a simultaneous static cross section load and a column lateral impact / N. Belov, D. Kopanitsa, A. Yugov, S. Kaparulin, A. Plyaskin, A. Kalichkina, A. Ustinov, N. Yugov, G. Kopanitsa // AIP Conference Proc. Advanced Materials in Technology and Construction. – Tomsk, 2016. – P. 47–53.

6. Galyautdinov Z.R. Deformation of reinforced concrete slabs on yielding supports under short-time dynamic loading // AIP Conference Proc. Youth, Science, Solutions: Ideas and Prospects. – Tomsk, 2017. – P. 40–44.
7. Trekin N.N., Krylov V.V. On the issue of punching shear capacity of reinforced concrete slabs under dynamic loading at ground space infrastructure facilities // Scientific Aspect. – 2018. – V. 7. – № 4. – P. 771–778.
8. Strength and deformability of reinforced concrete elements under oblique eccentric short-term dynamic compression, tension and bending / D. Sarkisov, N. Gorlenko, Y. Sarkisov, T. Shepelenko, G. Gorynin, G. Izmailov // E3S Web of Conferences. Topical Problems of Green Architecture, Civil and Environmental Engineering, TPACEE 2019. – 2020. – P. 14008.
9. Short and long term cracking behavior of GFRP reinforced concrete beams / C. Mias, L. Torres, M. Guadagnini, A. Turon // Composites Part B: Engineering. – 2015. – V. 77. – P. 223–231.
10. Lou T., Lopes S.M.R., Lopes A.V. FE analysis of short- and long-term behavior of simply supported slender prestressed concrete columns under eccentric end axial loads causing uniaxial bending // Engineering Structures. – 2015. – V. 85. – P. 52–62.
11. Correlation analysis of accelerated aging and natural aging of GFRP in reinforced concrete beams / J. Dong, X. He, H. Zhang, J. Zhang, Y. Yang, Y. Song, J. Rao // Journal of Wuhan University of technology (Transportation Science and Engineering). – 2017. – V. 41. – № 2. – P. 312–317.
12. Method of measurement of the dynamic strength of concrete under explosive loading / A.S. Savinykh, G.V. Garkushin, S.V. Razorenov, G.I. Kanel // International Journal of Fracture. – 2018. – V. 209. – P. 109–115.
13. Comment on the calculation models for reinforced concrete under intense dynamic loading / F. Gao, M. Wang, X. Zhang, Y. He, M.A. Li // Baozha Yu Chongji. – 2017. – V. 37. – № 2. – P. 365–376.
14. Demyanov A., Kolchunov V.I. The dynamic loading in longitudinal and transverse reinforcement at instant emergence of the spatial crack in reinforced concrete element under the action of a torsion with bending // Journal of Applied Engineering Science. – 2017. – V. 15. – № 3. – P. 381–386.
15. Mesoscopic simulation of the dynamic tensile behaviour of concrete based on a rate-dependent cohesive model / W. Zhou, L. Tang, G. Ma, X. Liu, M. Chen // International Journal of Impact Engineering. – 2016. – V. 95. – P. 165–175.
16. Li H.-Y., Teng J., Li Z.-H. An efficient platform HSNAS (GPU) for nonlinear static and dynamic analysis of reinforced concrete frames-II. Program verification and analysis // Zhendong yu Chongji. – 2016. – V. 35. – № 14. – P. 54–60.
17. Dynamic flexural strength of concrete under high strain rates / X. Chen, C. Chen, L. Xu, Y. Shao // Magazine of Concrete Research. – 2017. – V. 69. – № 3. – P. 109–119.
18. Гениев Г.А. О влиянии продолжительности действия нагрузки на прочность материала // Бетон и железобетон. – 1996. – № 4. – С. 19–22.
19. Кумпяк О.Г., Галаяутдинов З.Р. Расчет железобетонных плит на кратковременные динамические нагрузки с учетом реальных свойств материалов // Бетон и железобетон. – 2007. – № 6. – С. 15–18.
20. Yekai Yang, Chengqing Wu, Zhongxian Liu. Rate dependent behaviour of 3D printed ultra-high performance fibre-reinforced concrete under dynamic splitting tensile // Composite Structures. – 2023. – V. 309. – 116727.
21. Xiaoli Wei, Xiaodan Ren. Coupled viscosity-damage model for concrete under high strain rate // Engineering Fracture Mechanics. – 2023. – V. 277. – 108985.
22. High-strain rate compressive behavior of concrete with two different substituted recycled plastic aggregates: Experimental characterization and probabilistic modeling / B. Xiong, D. Falliano, L. Restuccia, F. di Trapani, C. Demartino, G.C. Marano // Construction and Building Materials. – 2023. – V. 368. – 130279.
23. Dynamic increase factors of concrete-like materials at very high strain rates / Z.H. Wang, H.M. Wen, H. Zheng, J.S. Cheng // Construction and Building Materials. – 2022. – V. 345. – 128270.
24. Hassan M., Wille K. Direct tensile behavior of steel fiber reinforced ultra-high performance concrete at high strain rates using modified split Hopkinson tension bar // Composites Part B: Engineering. – 2022. – V. 246. – 110259.
25. Lai D., Demartino C., Xiao Y. High-strain rate tension behavior of Fiber-Reinforced Rubberized Concrete // Cement and Concrete Composites. – 2022. – V. 131. – 104554.
26. High-strain rate compressive behavior of concrete made with substituted coarse aggregates: recycled crushed concrete and clay bricks / B. Xiong, C. Demartino, J. Xu, A. Simi, G.C. Marano, Y. Xiao // Construction and Building Materials. – 2021. – V. 301. – 123875.
27. Lai D., Demartino C., Xiao Y. High-strain rate compressive behavior of fiber-reinforced rubberized concrete // Construction and Building Materials. – 2022. – V. 319. – 125739.
28. Rezaei M., Issa M.A. Specimen and aggregate size effect on the dynamic fracture parameters of concrete under high loading rates // Engineering Fracture Mechanics. – 2022. – V. 260. – 108184.
29. Albertini C., Cardoni E., Labibes K. Study of the mechanical properties of plain concrete under dynamic loading // Exp. Mech. – 1999. – № 39. – P. 137–141.
30. Experimental and mesoscopic study of dynamic tensile properties of concrete using direct-tension technique / L. Chen, C. Yue, Y. Zhou, J. Zhang, X. Jiang, Q. Fang // International Journal of Impact Engineering. – 2021. – P. 155. – 103895.
31. Gerard G., Patrice B. Behavior of quasi-brittle material at high strain rate. Experiment and modeling // Eur. J. Mech. A. – 1998. – № 17-3. – P. 403–420.
32. Comparative study of strength-based damage evolution in ultra-high-performance concrete (UHPC) and conventional concrete (CC) under dynamic loading / Q. Sun, B. Williams, C. Loeffler, B. Martin, W. Heard, D. Frew, Nie X. // International Journal of Impact Engineering. – 2021. – P. 155. – 103893.
33. Zhang F., Poh L. H., Zhang M.-H. Resistance of cement-based materials against high-velocity small caliber deformable projectile impact // International Journal of Impact Engineering. – 2020. – 103629.
34. Projectile penetration of reinforced concrete considering the effect of steel reinforcement: experimental study and theoretical analysis / X. Zhang, H. Wu, S. Zhang, F. Huang // International Journal of Impact Engineering. – 2020. – 103653.
35. Effect of reinforcing steel on the impact resistance of reinforced concrete panel subjected to hard-projectile impact / S. Lee, C. Kim, Y. Yu, J.-Y. Cho // International Journal of Impact Engineering. – 2021. – P. 148. – 103762.
36. A study on the resistance of SC walls subjected to missile impact using large-scale impact tests / K. Kim, K. Lee, J. Shin, J. Lee, A. Varma // International Journal of Impact Engineering. – 2020. – P. 139. – 103507.
37. Hypervelocity penetration of concrete targets with long-rod steel projectiles: experimental and theoretical analysis / Y. Lu, Q. Zhang, Y. Xue, X. Guo, C. Shang, W. Liu, ... R. Long // International Journal of Impact Engineering. – 2020. – 103742.
38. Li P.P., Brouwers H.J.H., Yu Q. Influence of key design parameters of ultra-high performance fibre reinforced concrete on in-service bullet resistance // International Journal of Impact Engineering. – 2019. – 103434.
39. The composite damage effects of explosion after penetration in plain concrete targets / S. Sun, H. Lu, S. Yue, H. Geng, Z. Jiang // International Journal of Impact Engineering. – 2021. – P. 153. – 103862.
40. Experimental and theoretical study on steel long-rod projectile penetration into concrete targets with elevated impact velocities / C. Liu, X. Zhang, H. Chen, J. Wang, H. Wei, W. Xiong // International Journal of Impact Engineering. – 2019. – 103482.
41. Experimental and numerical studies on dynamic behavior of reinforced UHPC panel under medium-range explosions / Q. Su, H. Wu, H. Sun, Q. Fang // International Journal of Impact Engineering. – 2021. – P. 148. – 103761.
42. Shi Y., Wang J., Cui J. Experimental studies on fragments of reinforced concrete slabs under close-in explosions // International Journal of Impact Engineering. – 2020. – 103630.
43. Experimental and numerical analysis of CFRP strengthened RC columns subjected to close-in blast loading / J. Yan, Y. Liu, Z. Xu, Z. Li, F. Huang // International Journal of Impact Engineering. – 2020. – 103720.
44. Failure analysis of reinforced concrete slab under impact loading using a novel numerical method / J. Ning, F. Meng, T. Ma, X. Xu // International Journal of Impact Engineering. – 2020. – 103647.

45. Scaling the response of armor steel subjected to blast loading / T. Fu, M. Zhang, Q. Zheng, D. Zhou, X. Sun, X. Wang // International Journal of Impact Engineering. – 2021. – 153. – 103863.
46. Погодин-Алексеев Г.И. Динамическая крепость и хрупкость металлов. М.: Машиностроение, 1966. – 242 с.
47. Majeed Z.Z.A., Lam N.T.K., Gad E.F. Predictions of localized damage to concrete caused by a low-velocity impact // International Journal of Impact Engineering. – 2021. – 149. – 103799.
48. Cantilevered RC Wall Subjected to Combined Static and Impact Actions / A.C.Y. Yong, N.T.K. Lam, S.J. Menegon, E.F. Gad // International Journal of Impact Engineering. – 2020. – 103596.
49. Impact resistance of ultra-high performance concrete strengthened reinforced concrete beams / Jie Wei, Jun Li, Chengqing Wu, Zhong-xian Liu, Jiangang Fang // International Journal of Impact Engineering. – 2021. – 158. – 104023. – P. 1–23.
50. Zhu X.-C., Zhu H., Li H.-R. Drop-weight impact test on u-shape concrete specimens with statistical and regression analyses // Materials. – 2015. – № 8. – P. 5877–5890.
51. Behavior of ultra-high performance fiber-reinforced concrete (UHPFRC) filled steel tubular members under lateral impact loading / W. Wang, C. Wu, J. Li, Z. Liu, Y. Lv // International Journal of Impact Engineering. – 2019. – 103314.
52. Constitutive modelling of UHPCC material under impact and blast loadings / S. Yang, X. Kong, H. Wu, Q. Fang, H. Xiang // International Journal of Impact Engineering. – 2021. – 153. – 103860.
53. Response of ultra-high performance cementitious composites filled steel tube (UHPCC-FST) subjected to low-velocity impact / H. Wu, G.M. Ren, Q. Fang, J.Z. Liu // Thin Wall Struct. – 2019. – 144:106341.
54. Стенд для испытания железобетонных элементов на кратковременное динамическое растяжение: пат. 48225. РФ, МПК G01N 3/00, 3/08, 3/30, № 2005112503/22: заявл. 25.04.2005: опубл. 27.09.2005. – Бюл. № 27.
55. Тензометрическое устройство для измерения деформаций арматуры железобетонных конструкций: пат. 76117. РФ, МПК G01B 7/016, № 2008113329/22: заявл. 07.04.2008: опубл. 10.09.2008. – Бюл. № 25.
56. Установка для экспериментальных исследований строительных конструкций: пат. 66534. РФ, МПК G01N 3/00, № 2007110136/22: заявл. 19.03.2007: опубл. 10.09.2007. – Бюл. № 25.
57. Стенд для испытания железобетонных элементов на кратковременное динамическое сжатие: пат. RU 2401424 C1. РФ, МПК G01N 3/30, № 2009131954/28: заявл. 24.08.2009: опубл. 10.10.2010. – Бюл. № 28.
58. Стенд для испытания железобетонных элементов на действие изгибающих моментов, продольных и поперечных сил при кратковременном динамическом нагружении: пат. RU 90901 U1. РФ, МПК G01N 3/08; 3/30, № 2009136855/22: заявл. 05.10.2009: опубл. 20.01.2010. – Бюл. № 21.
59. Стенд для испытания железобетонных элементов на совместное кратковременное динамическое воздействие изгибающего и крутящего моментов: пат. RU 2570231 C1. РФ, МПК G01N 3/30; G01M 7/08, № 2014136689/28: заявл. 09.09.2014: опубл. 10.12.2015. – Бюл. № 34.
60. Стенд для испытания железобетонных элементов с фиксированной степенью горизонтального обжатия на кратковременный динамический изгиб: пат. RU 147262 U1. РФ, МПК G01N 3/30, № 2014124076/28: заявл. 11.06.2014: опубл. 27.10.2014. – Бюл. № 30.
61. Стенд для испытания железобетонных элементов на динамический изгиб: пат. RU 148397 U1. РФ, МПК G01N 3/00, № 2014117330/28: заявл. 29.04.2014: опубл. 10.12.2014. – Бюл. № 34.
62. Стенд для динамических испытаний изгибаемых железобетонных элементов: пат. RU 158496 U1. РФ, МПК G01N 3/30; G01M 7/08, № 2015134838/28: заявл. 18.08.2015: опубл. 10.01.2016. – Бюл. № 1.
63. Стенд для испытания железобетонных элементов на продавливание при кратковременной динамической нагрузке: пат. RU 2726031 C1. РФ, МПК G01N 3/303; G01M 7/08, № 2020102934: заявл. 24.01.2020: опубл. 08.07.2020. – Бюл. № 19.
64. Однокопылов Г.И., Саркисов Д.Ю. Оценка параметров разрушающей нагрузки при ударно-волновом нагружении для ответственных строительных конструкций сооружений нефтегазового комплекса // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2017. – Т. 328. – № 3. – С. 85–95.
65. Однокопылов Г.И., Саркисов Д.Ю., Бутузов Е.А. Оценка степени живучести ответственных строительных конструкций при ударно-волновом нагружении // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2018. – Т. 329. – № 12. – С. 122–135.

Поступила: 19.05.2023 г.

Прошла рецензирование: 04.09.2023 г.

Информация об авторах

Однокопылов Г.И., доктор технических наук, профессор отделения электроэнергетики и электротехники Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Саркисов Д.Ю., кандидат технических наук, доцент кафедры железобетонных и каменных конструкций Томского государственного архитектурно-строительного университета.

UDC 69.058.8

EXPERIENCE IN CREATING STANDS FOR TESTING REINFORCED CONCRETE STRUCTURES OF CRITICAL OIL AND GAS FACILITIES

Georgy I. Odnokopylov¹,
OGLz@yandex.ru

Dmitriy Yu. Sarkisov²,
Milandd@yandex.ru

¹ National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

² Tomsk State University of Architecture and Building,
2, Solyanaya square, Tomsk, 634003, Russia.

The relevance of the work is caused by the increased probability of short-term shock and explosive dynamic loads due to terrorist acts and other emergency situations affecting the construction structures of critical buildings and structures of oil and gas facilities. An example of such impacts is the recent terrorist attack on the Nord Stream gas pipelines. Due to the large number of parameters affecting the physical process of deformation of structures with this type of impact, an experimental research is currently an integral part of scientific research in this area. Such studies are especially relevant for reinforced concrete structures, which, on the one hand, are very widely used in construction, and on the other, have a complex nonlinear nature of deformation. To conduct experimental research, it is necessary to design and implement specialized stands, with the help of which it is possible to create a short-term dynamic effect on the structure. A review of the literature data has shown that test stands based on drop-weight stands are most often created for conducting such studies. In such stands, the energy of a falling load is used to destroy structures. It follows from the above that the design and improvement of stands for research of reinforced concrete structures on the effect of short-term dynamic loads is an urgent task of practical importance.

The aim of the work is to describe the structures of the test stands created on the basis of the drop-weight stand in the laboratory of the Reinforced Concrete and Stone Structures Department, Tomsk State University of Architecture and Building, to identify their main advantages and indicate disadvantages; as well as to state further development paths in the field of design and implementation of such stands.

Methods: theoretical analysis of literature and Internet sources, modeling, experimental research.

Results. Various modifications of test stands based on a drilling rig for research of reinforced concrete structures have been designed and implemented. The main advantages and disadvantages of such stands are shown and further ways of their development are formulated.

Key words:

Test stand, drop-weight stand, load signal form, short-term dynamic loading, reinforced concrete, experimental studies.

This work was carried out within the government contract FEMN-2022-0004 of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation.

REFERENCES

1. Popov N.N., Rastorguev B.S. *Voprosy rascheta i konstruirovaniya spetsialnykh sooruzheniy* [Issues of calculation and design of special structures]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1980. 190 p.
2. Popov N.N., Rastorguyev B.S. *Raschet zhelezobetonnykh konstruksiy na deystvie kratkovremennykh dinamicheskikh nagruzok* [Calculation of reinforced concrete structures for short-term dynamic loads]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1964. 151 p.
3. Plevkov V.S. *Dinamicheskaya prochnost betona i armatury zhelezobetonnykh konstruksiy* [Dynamic strength of concrete and rebar reinforced concrete structures]. Tomsk, TSUAB Publ., 1996. 64 p.
4. Kumpyak O.G., Galyautdinov Z.R., Kokorin D.N. *Prochnost i deformativnost zhelezobetonnykh konstruksiy na podatlivykh oporakh pri kratkovremennom dinamicheskom nagruzhении*. Monografiya [Strength and deformability of reinforced concrete structures on compliant supports under short-term dynamic loading. Monograph]. Tomsk, TSUAB Publ., 2016. 272 p.
5. Belov N., Kopanitsa D., Yugov A., Kaparulin S., Plyaskin A., Kalichkina A., Ustinov A., Yugov N., Kopanitsa G. Calculation of reinforced-concrete frame strength under a simultaneous static cross section load and a column lateral impact. *AIP Conference Proc. Advanced Materials in Technology and Construction*. Tomsk, 2015. pp. 47–53.
6. Galyautdinov Z.R. Deformation of reinforced concrete slabs on yielding supports under short-time dynamic loading. *AIP Conference Proc. Youth, Science, Solutions: Ideas and Prospects*. Tomsk, 2017. pp. 40–44.
7. Trekin N.N., Krylov V.V. On the issue of punching shear capacity of reinforced concrete slabs under dynamic loading at ground space infrastructure facilities. *Scientific Aspect*, 2018, vol. 7, no. 4, pp. 771–778.
8. Sarkisov D., Gorlenko N., Sarkisov Y., Shepelenko T., Gorynin G., Izmailov G. Strength and deformability of reinforced concrete elements under oblique eccentric short-term dynamic compression, tension and bending. *E3S Web of Conferences. Topical Problems of Green Architecture, Civil and Environmental Engineering*, TPACEE 2019, 2020. pp. 14008.
9. Mias C., Torres L., Guadagnini M., Turon A. Short and long term cracking behavior of GFRP reinforced concrete beams. *Composites Part B: Engineering*, 2015, vol. 77, pp. 223–231.
10. Lou T., Lopes S.M.R., Lopes A.V. FE analysis of short- and long-term behavior of simply supported slender prestressed concrete columns under eccentric end axial loads causing uniaxial bending. *Engineering Structures*, 2015, vol. 85, pp. 52–62.
11. Dong J., He X., Zhang H., Zhang J., Yang Y., Song Y., Rao J. Correlation analysis of accelerated aging and natural aging of GFRP in reinforced concrete beams. *Journal of Wuhan University of technology (Transportation Science and Engineering)*, 2017, vol. 41, no. 2, pp. 312–317.
12. Savinykh A.S., Garkushin G.V., Razorenov S.V., Kanel G.I. Method of measurement of the dynamic strength of concrete under explosive loading. *International Journal of Fracture*, 2017, vol. 209, pp. 109–115.

13. Gao F., Wang M., Zhang X., He Y., Li M. A comment on the calculation models for reinforced concrete under intense dynamic loading. *Baozha Yu Chongji*, 2017, vol. 37, no. 2, pp. 365–376.
14. Demyanov A., Kolchunov V.I. The dynamic loading in longitudinal and transverse reinforcement at instant emergence of the spatial crack in reinforced concrete element under the action of a torsion with bending. *Journal of Applied Engineering Science*, 2017, vol. 15, no. 3, pp. 381–386.
15. Zhou W., Tang L., Ma G., Liu X., Chen M. Mesoscopic simulation of the dynamic tensile behaviour of concrete based on a rate-dependent cohesive model. *International Journal of Impact Engineering*, 2016, vol. 95, pp. 165–175.
16. Li H.-Y., Teng J., Li Z.-H. An efficient platform HSNAS (GPU) for nonlinear static and dynamic analysis of reinforced concrete frames-II. Program verification and analysis, *Zhendong yu Chongji*, 2016, vol. 35, no. 14, pp. 54–60.
17. Chen X., Chen C., Xu L., Shao Y. Dynamic flexural strength of concrete under high strain rates, *Magazine of Concrete Research*, 2017, vol. 69, no. 3, pp. 109–119.
18. Geniev G.A. O vliyaniy prodolzhitel'nosti deystviya nagruzki na prochnost materiala [Effect of duration of load action on material strength]. *Concrete and reinforced concrete*, 1996, no. 4, pp. 19–22.
19. Kumpyak O.G., Galyautdinov Z.R. Raschet zhelezobetonnykh plit na kratkovremennyye dinamicheskie nagruzki s uchetom realnykh svoystv materialov [Calculation of reinforced concrete slabs for short-time dynamic loads taking into account the real properties of materials Concrete and reinforced concrete]. *Concrete and reinforced concrete*, 2007, no. 6, pp. 15–18.
20. Yekai Yang, Chengqing Wu, Zhongxian Liu. Rate dependent behaviour of 3D printed ultra-high performance fibre-reinforced concrete under dynamic splitting tensile. *Composite Structures*, vol. 309, 2023, pp. 116727.
21. Xiaoli Wei, Xiaodan Ren. Coupled viscosity-damage model for concrete under high strain rate. *Engineering Fracture Mechanics*, 2023, vol. 277, pp. 108985.
22. Xiong B., Falliano D., Restuccia L., Di Trapani F., Demartino C., Marano G.C. High-strain rate compressive behavior of concrete with two different substituted recycled plastic aggregates: Experimental characterization and probabilistic modeling. *Construction and Building Materials*, 2023, vol. 368, pp. 130279.
23. Wang Z.H., Wen H.M., Zheng H., Cheng J.S. Dynamic increase factors of concrete-like materials at very high strain rates. *Construction and Building Materials*, 2022, vol. 345, pp. 128270.
24. Hassan M., Wille K. Direct tensile behavior of steel fiber reinforced ultra-high performance concrete at high strain rates using modified split Hopkinson tension bar. *Composites Part B: Engineering*, 2022, vol. 246, pp. 110259.
25. Lai D., Demartino C., Xiao Y. High-strain rate tension behavior of Fiber-Reinforced Rubberized Concrete. *Cement and Concrete Composites*, 2022, vol. 131, pp. 104554.
26. Xiong B., Demartino C., Xu J., Simi A., Marano G.C., Xiao Y. High-strain rate compressive behavior of concrete made with substituted coarse aggregates: Recycled crushed concrete and clay bricks. *Construction and Building Materials*, 2021, vol. 301, pp. 123875.
27. Lai D., Demartino C., Xiao Y. High-strain rate compressive behavior of Fiber-Reinforced Rubberized Concrete. *Construction and Building Materials*, 2022, vol. 319, pp. 125739.
28. Rezaei M., Issa M.A. Specimen and aggregate size effect on the dynamic fracture parameters of concrete under high loading rates. *Engineering Fracture Mechanics*, 2022, vol. 260, pp. 108184.
29. Albertini C., Cardoni E., Labibes K. Study of the mechanical properties of plain concrete under dynamic loading. *Exp. Mech.*, 1999, no. 39, pp. 137–141.
30. Chen L., Yue C., Zhou Y., Zhang J., Jiang X., Fang Q. Experimental and mesoscopic study of dynamic tensile properties of concrete using direct-tension technique. *International Journal of Impact Engineering*, 2021, 155, pp. 103895.
31. Gerard G., Patrice B. Behavior of quasi-brittle material at high strain rate. Experiment and modeling. *Eur. J. Mech. A.*, 1998, no. 17-3, pp. 403–420.
32. Sun Q., Williams B., Loeffler C., Martin B., Heard W., Frew D., Nie X. Comparative study of strength-based damage evolution in ultra-high-performance concrete (UHPC) and conventional concrete (CC) under dynamic loading. *International Journal of Impact Engineering*, 2021, 155, pp. 103893.
33. Zhang F., Poh L. H., Zhang M.-H. Resistance of cement-based materials against high-velocity small caliber deformable projectile impact. *International Journal of Impact Engineering*, 2020, pp. 103629.
34. Zhang X., Wu H., Zhang S., Huang F. Projectile penetration of reinforced concrete considering the effect of steel reinforcement: experimental study and theoretical analysis. *International Journal of Impact Engineering*, 2020, pp. 103653.
35. Lee S., Kim C., Yu Y., Cho J.-Y. Effect of reinforcing steel on the impact resistance of reinforced concrete panel subjected to hard-projectile impact. *International Journal of Impact Engineering*, 2021, 148, pp. 103762.
36. Kim K., Lee K., Shin J., Lee J., Varma A. A study on the resistance of SC walls subjected to missile impact using large-scale impact tests. *International Journal of Impact Engineering*, 2020, 139, pp. 103507.
37. Lu Y., Zhang Q., Xue Y., Guo X., Shang C., Liu W., Long R. Hypervelocity penetration of concrete targets with long-rod steel projectiles: experimental and theoretical analysis. *International Journal of Impact Engineering*, 2020, pp. 103742.
38. Li P.P., Brouwers H.J.H., Yu Q. Influence of key design parameters of ultra-high performance fibre reinforced concrete on in-service bullet resistance. *International Journal of Impact Engineering*, 2019, pp. 103434.
39. Sun S., Lu H., Yue S., Geng H., Jiang Z. The composite damage effects of explosion after penetration in plain concrete targets. *International Journal of Impact Engineering*, 2021, 153, pp. 103862.
40. Liu C., Zhang X., Chen H., Wang J., Wei H., Xiong W. Experimental and theoretical study on steel long-rod projectile penetration into concrete targets with elevated impact velocities. *International Journal of Impact Engineering*, 2019, pp. 103482.
41. Su Q., Wu H., Sun H., Fang Q. Experimental and numerical studies on dynamic behavior of reinforced UHPC panel under medium-range explosions. *International Journal of Impact Engineering*, 2021, 148, pp. 103761.
42. Shi Y., Wang J., Cui J. Experimental studies on fragments of reinforced concrete slabs under close-in explosions. *International Journal of Impact Engineering*, 2020, pp. 103630.
43. Yan J., Liu Y., Xu Z., Li Z., Huang F. Experimental and numerical analysis of CFRP strengthened RC columns subjected to close-in blast loading. *International Journal of Impact Engineering*, 2020, pp. 103720.
44. Ning J., Meng F., Ma T., Xu X. Failure analysis of reinforced concrete slab under impact loading using a novel numerical method. *International Journal of Impact Engineering*, 2020, pp. 103647.
45. Fu T., Zhang M., Zheng Q., Zhou D., Sun X., Wang X. Scaling the response of armor steel subjected to blast loading. *International Journal of Impact Engineering*, 2021, 153, pp. 103863.
46. Pogodin-Alekseev G.I. *Dinamicheskaya krepost i khrupkost metallov* [Dynamic strength and brittleness of metals]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1966. 242 p.
47. Majeed Z.Z.A., Lam N.T.K., Gad E.F. Predictions of localized damage to concrete caused by a low-velocity impact. *International Journal of Impact Engineering*, 2021, 149, pp. 103799.
48. Yong A.C.Y., Lam N.T.K., Menegon S.J., Gad E.F. Cantilevered RC wall subjected to combined static and impact actions. *International Journal of Impact Engineering*, 2020, pp. 103596.
49. Jie Wei, Jun Li, Chengqing Wu, Zhong-xian Liu, Jianguang Fang. Impact resistance of ultra-high performance concrete strengthened reinforced concrete beams. *International Journal of Impact Engineering*, 2021, 158, 104023, pp. 1–23.
50. Zhu X.-C., Zhu H., Li H.-R. Drop-weight impact test on u-shape concrete specimens with statistical and regression analyses. *Materials*, 2015, no. 8, pp. 5877–5890.
51. Wang W., Wu C., Li J., Liu Z., Lv Y. Behavior of ultra-high performance fiber-reinforced concrete (UHPFRC) filled steel tubular members under lateral impact loading. *International Journal of Impact Engineering*, 2019, pp. 103314.
52. Yang S., Kong X., Wu H., Fang Q., Xiang H. Constitutive modeling of UHPCC material under impact and blast loadings. *International Journal of Impact Engineering*, 2021, 153, pp. 103860.
53. Wu H., Ren G.M., Fang Q., Liu J.Z. Response of ultra-high performance cementitious composites filled steel tube (UHPCC-FST) subjected to low-velocity impact. *Thin Wall Struct.*, 2019, pp. 144:106341.

54. Plevkov V.S., Sarkisov D.Yu. *Stend dlya ispytaniya zhelezobetonnykh elementov na kratkovremennoe dinamicheskoe rastyazhenie* [Stand for testing reinforced concrete elements for short-term dynamic stretching]. Patent 48225. RF, no. 2005112503/22, 2005.
55. Plevkov V.S., Odnokopylov G.I., Sarkisov D.Yu., Tigay O.Yu., Ismailov G.M. *Tenzometricheskoe ustroystvo dlya izmereniya deformatsiy armatury zhelezobetonnykh konstruksiy* [Strain gauge device for measuring deformations of reinforcement of reinforced concrete structures]. Patent 76117. RF, no. 2008113329/22, 2008.
56. Plevkov V.S., Odnokopylov G.I., Sarkisov D.Yu., Tigay O.Yu., Odnokopylova O.A. *Ustanovka dlya eksperimentalnykh issledovaniy stroitelnykh konstruksiy* [Installation for experimental studies of building structures]. Patent 66534 RF, no. 2007110136/22, 2007.
57. Plevkov V.S., Odnokopylov G.I., Baldin I.V., Sarkisov D.Yu., Goncharov M.E., Dzuba P.V. *Stend dlya ispytaniya zhelezobetonnykh elementov na kratkovremennoe dinamicheskoe szhatie* [Stand for testing reinforced concrete elements for short-term dynamic compression]. Patent RF 2401424 C1, no. 2009131954/28, 2010.
58. Plevkov V.S., Odnokopylov G.I., Baldin I.V., Baldin S.V. *Stend dlya ispytaniya zhelezobetonnykh elementov na deystvie izgibayushchikh momentov prodolnykh i poperechnykh sil pri kratkovremennom dinamicheskom nagruzhении* [Stand for testing reinforced concrete elements for the action of bending moments, longitudinal and transverse forces under short-term dynamic loading]. Patent RU 90901 U1. RF, no. 2009136855/22, 2010.
59. Rodevich V.V., Odnokopylov G.I., Arzamastsev S.A. *Stend dlya ispytaniya zhelezobetonnykh elementov na sovmestnoe kratkovremennoe dinamicheskoe vozdeystvie izgibayushchego i krutyashchego momentov* [Stand for testing reinforced concrete elements for the combined short-term dynamic effect of bending and torques]. Patent RU 2570231 C1. RF, no. 2014136689/28, 2015.
60. Kumpyak O.G., Odnokopylov G.I., Galyautdinov Z.R., Galyautdinov D.R. *Stend dlya ispytaniya zhelezobetonnykh elementov s fiksirovannoy stepenyu gorizontalnogo obzhatiya na kratkovremenny dinamicheskiy izgib* [Stand for testing reinforced concrete elements with a fixed degree of horizontal compression for short-term dynamic bending]. Patent. RU 147262 U1. RF, no. 2014124076/28, 2014.
61. Kumpyak O.G., Odnokopylov G.I., Meshcheulov N.V., Kondratenko O.O. *Stend dlya ispytaniya zhelezobetonnykh elementov na dinamicheskiy izgib* [Stand for testing reinforced concrete elements for dynamic bending]. Patent RU 148397 U1. RF, no. 2014117330/28, 2014.
62. Plevkov V.S., Odnokopylov G.I., Kudyakov K.L., Nevsky A.V., Meshcheulov N.V., Galyautdinov D.R. *Stend dlya dinamicheskikh ispytaniy zhelezobetonnykh elementov* [Stand for dynamic testing of reinforced concrete elements]. Patent RU 158496 U1. RF, no. 2015134838/28, 2016.
63. Odnokopylov G.I., Sarkisov D.Yu., Ergeshev E.T., Krilov V.V., Evstafeva E.B. *Stend dlya ispytaniya zhelezobetonnykh elementov na prodavlivanie pri kratkovremennoy dinamicheskoy nagruzke* [Stand for testing reinforced concrete elements for punching under short-term dynamic load]. Patent RU 2726031 C1. RF, no. 2020102934, 2020.
64. Odnokopylov G.I., Sarkisov D.Yu. Evaluation of breaking load parameters under shock wave loading for critical constructions of oil and gas sector facilities. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 3, pp. 85–95. In Rus.
65. Odnokopylov G.I., Sarkisov D.Yu., Butuzov E.A. Evaluation of survivability degree of responsible building structures under shock wave loading. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 12, pp. 122–135. In Rus.

Received: 19 May 2023.
Reviewed: 4 September 2023.

Information about the authors

Georgy I. Odnokopylov, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Dmitriy Yu. Sarkisov, Cand. Sc., associate professor, Tomsk State University of Architecture and Building.

УДК 550.46, 550.47

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ РЕГИОНАЛЬНОГО УРАНОВОГО СТАТУСА НА ПРИМЕРЕ РЕСПУБЛИКИ БАШКОРТОСТАН

Злобина Анастасия Николаевна¹,
anastasiyazl@mail.ru

Фархутдинова Лейла Муратовна²,
farkhutdinova@gmail.com

Фархутдинов Исхак Мансурович^{3,4},
iskhakgeo@gmail.com

Беляновская Александра Игоревна⁵,
alexandra.belyanovskaya@outlook.com

Барановская Наталья Владимировна⁶,
nata@tpu.ru

Чесалова Елена Игоревна⁵,
chesalova_ei@mail.ru

Фархутдинов Анвар Мансурович⁷,
anvar.farkhutdinov@cyu.fr

Хайрулина Лариса Александровна¹,
artthemix@mail.ru

Крестьянникова Елизавета Вячеславовна^{5,8,9},
li3452@yandex.ru

¹ Уфимский университет науки и технологии,
Россия, 450076, г. Уфа, ул. Заки Валиди, 32.

² Башкирский государственный медицинский университет,
Россия, 450000, г. Уфа, ул. Ленина, 3.

³ ООО «РН-БашНИПинефть»,
Россия, 450103, г. Уфа, ул. Бехтерева, 3/1.

⁴ Государственный геологический музей им. В.И. Вернадского РАН,
Россия, 103009, г. Москва, ул. Моховая, 11, стр. 11.

⁵ Тюменский государственный университет,
Россия, 625003, г. Тюмень, ул. Володарского, 6.

⁶ Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

⁷ Университет Сержи-Париж,
Франция, 95000, г. Сержи-Понтуаз, бульвар Де Порт, 33.

⁸ Тюменский государственный медицинский университет,
Россия, 625023, г. Тюмень, ул. Одесская, 54.

⁹ Тюменский индустриальный университет,
Россия, 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38.

Актуальность. Уран является радиоактивным, канцерогенным, токсичным элементом, способным накапливаться в организме человека и вызывать различные виды патологии (нарушение функции почек, рак крови, почек, кишечника и др.). Это обуславливает актуальность изучения закономерностей распределения данного химического элемента в среде проживания. Главным источником поступления урана в организм человека является питьевая вода, что подтверждается результатами расчета коэффициента накопления и корреляционным анализом, показавшим высокую зависимость концентрации урана в волосах от его содержания в наклапи питьевых вод Республики Башкортостан. Метод оценки содержания урана в природных средах, включающий геохимический, литологический, гидрогеологический, тектонический анализы и изучение техногенных факторов, позволяет достаточно точно определить главные ресурсы питания ураном питьевой воды на изучаемой территории.

Цель: оценить значимость геоэкологических факторов на территории Республики Башкортостан в формировании регионального уранового статуса на основе изучения содержания урана в наклапи питьевых вод и в волосах жителей.

Методы. Концентрация урана в наклапи питьевых вод и волосах детей изучалась с помощью инструментального нейтронно-активационного анализа с использованием исследовательского ядерного реактора ИРТ-Т ТПУ. Для обработки данных использовались программные пакеты Statistica 10 и Microsoft Excel 2013. Карта пространственного распределения урана была построена с помощью программного обеспечения ArcGIS 10.2 в модуле Geostatistical Analyst с использованием метода обратных взвешенных расстояний.

Результаты. На территории Республики Башкортостан наблюдается широкий разброс значений содержания урана как в наклапи питьевых вод (диапазон от 0,01 до 61,0 мг/кг), так и в волосах жителей (от 0,001 до 0,411 мг/кг). Среднее содержание урана в наклапи питьевых вод (515 проб) составило 5,4 мг/кг, в волосах (182 пробы) – 0,04 мг/кг. Пространственное распределение урана имеет четкую согласованность с геоэкологическими условиями местности. Выделяются зоны повышенной концентрации урана в наклапи и волосах, где содержание урана выше фонового значения по республике: западная платформенная

и южная горная зоны. Наряду с положительными аномалиями существуют отрицательные, где уровень элемента ниже среднего показателя: северная платформенная и северная горная зоны. Неравномерное распределение урана объясняется как природными (широкое разнообразие горных пород, гидрогеологический и тектонический факторы), так и техногенными факторами (разработка нефтяных и рудных месторождений). Проведенный корреляционный анализ показал прямую зависимость содержания U в волосах детей от его концентрации в напилье питьевых вод ($R^2=0,8$), что свидетельствует о ведущей роли питьевой воды в поступлении урана в организм человека. Учитывая выявленный более высокий уровень урана в волосах жителей Башкортостана по сравнению с рядом других регионов РФ и мира, а также способность данного химического элемента к кумуляции в организме, особую актуальность приобретает изучение влияния уранового статуса на состояние здоровья населения. Полученные результаты могут служить теоретической базой для выяснения биологической роли урана и решения фундаментальной проблемы связи геоэкологии и здоровья человека.

Ключевые слова:

природная радиоактивность, напилье питьевых вод, химический состав волос, геохимия, геоэкология.

Введение

Геологическая среда является главным источником элементов-примесей в биосфере. Благодаря широкому спектру хорошо изученных геологических обстановок, обуславливающих микроэлементное разнообразие, территория Республики Башкортостан (РБ) представляет собой уникальную возможность для исследования роли геоэкологических факторов в формировании регионального микроэлементного профиля. Урановый профиль (статус) – результаты исследования содержания элемента, отражающие особенности его накопления и распределения в той или иной среде.

Содержание различных химических элементов в окружающей среде в зависимости от особенностей геологического строения местности изучалось целым рядом авторов [1–11]. Однако работы, освещающие влияние комплекса геоэкологических факторов на региональные особенности уранового статуса немногочисленны [12–19].

В организме человека уран и продукты его распада аккумулируются в органах и тканях и при хроническом поступлении могут быть токсичными и канцерогенными, повышая риск нарушений функции почек, развития рака крови, почек, кишечника и других органов [15, 20–23]. Это обуславливает актуальность изучения закономерностей распределения данного химического элемента в среде проживания.

Основным источником поступления (около 85 %) урана в организм человека является вода [13, 24]. Эффективным методом оценки содержания химических элементов в организме человека является изучение элементного состава волос, которые представляют собой «минеральный образ» человека [25, 26]. По данным литературы, уран также аккумулируется в волосах, что позволяет использовать их в качестве биопробы [27–29].

Цель настоящей работы – оценить значимость геоэкологических факторов на территории РБ в формировании регионального уранового статуса на основе изучения содержания урана в напилье питьевых вод и в волосах жителей. Выдвинута следующая гипотеза исследования: особенности регионального уранового статуса определяются геоэкологическими условиями местности.

Материалы и методы

Район исследования

Исследование проведено на территории РБ – региона центральной части России, площадью 143600 км².

В геологическом отношении западная часть РБ представлена обширной равниной, приуроченной к юго-восточной окраине Восточно-Европейской платформы, а восточная часть – к Южному Уралу, занимающему 1/3 территории республики. В основании платформы залегает мощный гранитоидный (кристаллический) фундамент, поверхность которого, согласно данным геофизики, погружается в юго-восточном направлении от 2–3 до 16–18 км. В этом же направлении возрастает мощность осадочного чехла. Широкий диапазон геологических структур (платформа, предгорный прогиб, складчатая область) и горных пород (осадочные, вулканогенные, магматические, метаморфические породы различного состава, строения и возраста) обуславливает специфику микроэлементного состава местности и позволяет оценивать биологическую роль геоэкологических факторов.

Отбор проб

Оценка содержания урана в питьевых водах была проведена на основе изучения концентрации элемента в пробах напилье питьевых вод, поскольку, согласно опубликованным данным, имеет ряд преимуществ в геохимических исследованиях. Напилье отражает накопление элементов за длительный срок, её легче отбирать и транспортировать, более того, исследования, осуществленные на территории Томской, Павлодарской областей и в Байкальском регионе, выявили высокую корреляционную связь (от 0,62 до 0,96) между уровнем урана в питьевой воде и напилье [17, 30–33]. Пробы напилье питьевых вод были отобраны из различной домашней посуды (эмалированные и электрические чайники, котелки, самовары), которая использовалась для кипячения воды как из центральных, так и из индивидуальных (колодцы, ручьи) источников водоснабжения. В общей сложности было проанализировано 515 проб из 262 населенных пунктов РБ.

Отбор проб волос проводился в соответствии с рекомендацией МАГАТЭ [34]. Образцы волос были взяты у детей и подростков (обоих полов, в возрасте от 4 до 18 лет), постоянно проживающих по месту рождения. Выбор данной возрастной категории позволяет нивелировать факторы, влияющие на формирование микроэлементного статуса у взрослого населения – курение, хронические заболевания, профессиональные вредности и т. д. В общей сложности было проанализировано 182 пробы волос детей из 37

населённых пунктов. При взятии образцов регистрировались возраст, пол, полное имя, адрес, место рождения ребенка. Выборка включала детей без каких-либо зафиксированных отклонений в состоянии здоровья.

Аналитические методы

Концентрация урана в накипи питьевых вод и волосах детей изучалась с помощью инструментального нейтронно-активационного анализа (ИНАА) с использованием исследовательского ядерного реактора ИРТ-Т ТПУ (свидетельство об аккредитации № RA.RU.21AB27 (08.04.2015); аналитики – Ю.Ф. Судыко, Л.Ф. Богутская). Предел обнаружения урана методом ИНАА от $n \times 1\%$ до $n \times 10^{-7}\%$. Накипь питьевых вод измельчали до 100 меш, а затем фасовали по 100 мг в пакетики из алюминиевой фольги. Волосы детей также упаковывали навесками по 100 мг в пакетики из алюминиевой фольги. В качестве контроля качества метода стандартный образец Элодея канадская, ЭК-1 (8921-2007), облучали одновременно и в тех же условиях, что и исследуемые образцы. Этот метод эффективен при обнаружении радиоактивных элементов [35].

Обработка результатов

Для обработки данных использовались программные пакеты Statistica 10 и Microsoft Excel 2013. Среднее арифметическое, стандартная ошибка, среднее геометрическое, медиана, минимальные и максимальные значения, стандартное отклонение, асимметричность, эксцесс, коэффициент корреляции Пирсона были определены путем статистической обработки данных. Карта пространственного распределения урана была построена с помощью программного обеспечения ArcGIS 10.2 в модуле Geostatistical Analyst с использованием метода обратных взвешенных расстояний (Inverse Distance Weighting – IDW).

Коэффициент накопления (КН) урана рассчитан делением концентрации элемента в волосах детей на его содержание в накипи питьевых вод: $КН = C_{\text{волосы}} / C_{\text{накипь}}$.

Коэффициент концентрации (КК) урана в накипи рассчитан делением концентрации элемента в накипи питьевых вод на его медианное содержание в накипи РБ: $КК_{\text{накипь}} = C_{\text{накипь}} / C_{\text{медиана накипь}}$.

КК урана в волосах рассчитан делением концентрации элемента в волосах на его медианное содержание в волосах жителей РБ: $КК_{\text{волосы}} = C_{\text{волосы}} / C_{\text{медиана волосы}}$.

Ограничения исследования

1. Пробы волос жителей РБ анализируются без учёта пищевых привычек.
2. В выборках для расчета статистических параметров концентрации урана в накипи питьевой воды и волосах детей было проанализировано разное количество проб (515 проб накипи и 182 пробы волос).
3. Корреляционный анализ волосы–накипь проводился по рассчитанному медианному значению

для проб из одинаковых населённых пунктов, общим числом 82 пробы накипи и 140 проб волос.

Результаты

По данным исследования 515 проб медианное содержание урана в накипи питьевых вод РБ составило 5,4 мг/кг (минимальное значение – 0,01, максимальное – 61,0 мг/кг) и оказалось ниже данного показателя в таких регионах России, как Челябинская область (26,0 мг/кг), Республики Бурятия (21,1 мг/кг), Алтай (10,7 мг/кг), а также в Павлодарской области Казахстана (27,4 мг/кг), в то же время выше, чем в Томской (1,9 мг/кг) и Кемеровской (3,9 мг/кг) областях [36]. Статистические параметры распределения урана представлены в табл. 1.

Таблица 1. Статистические параметры распределения U в накипи питьевых вод и в волосах детей на территории РБ

Table 1. Statistical parameters of U content in drinking water scale and children's hair in the Republic of Bashkortostan

Статистические параметры Statistical parameters	U	
	в накипи питьевых вод in scale (N=515)	в волосах детей in children's hair (N=182)
	мг/кг/mg/kg	
Среднее арифметическое ± Стандартная ошибка Arithmetic mean ± Standard error	8,6±0,4	0,06±0,005
Среднее геометрическое Geometric mean	4,9	0,04
Медиана/Median	5,4	0,04
Минимальное значение Minimum	0,01	0,001
Максимальное значение Maximum	61,0	0,41
Стандартное отклонение Standard deviation	9,1	0,07
Асимметрия/Skewness	2,0	2,5
Эксцесс/Kurtosis	4,2	7,4
Коэффициент вариации Variation coefficient, %	102	110

Медианное значение урана в волосах жителей РБ по данным 182 проб составило 0,04 мг/кг (минимальное значение – 0,001, максимальное – 0,411 мг/кг). Данный уровень оказался ниже, чем в Томской, Челябинской, Иркутской областях России, Финляндии, Швеции, Израиле, Ираке, но выше, чем в Кемеровской области, Словении и некоторых районах Бразилии (табл. 2).

Разброс результатов определения урана в различных регионах, представленных в табл. 2, обусловлен, по-видимому, территориальными геоэкологическими особенностями. Преимущественная однонаправленность изменений в содержании урана по данным накипи питьевых вод и волос жителей подтверждает важную роль питьевых вод в формировании уранового профиля организма человека. Подтвержденная собственными и литературными данными корреляция в содержании урана в воде и в волосах человека свидетельствует о целесообразности использования результатов биологического мониторинга для оценки содержания урана в компонентах природной среды.

Таблица 2. Концентрация U в волосах человека в различных регионах мира, среднее арифметическое, ppm

Table 2. Worldwide U concentration in human hair, mean value, ppm

Район исследования Study region	Анализ Analysis	Количество проб Number of samples	U, мг/кг/mg/kg			Источник References
			Медиана Median	Мин. Min	Макс. Max	
Республика Башкортостан, РФ Republic of Bashkortostan, Russia	ИНАА INAA	182	0,04	0,001	0,4	Собственные данные Own data
Кемеровская область, РФ Kemerovo oblast, Russia	ИНАА INAA	17	0,02	0,001	0,2	[19]
	ИСП-МС ICP-MS	23	0,02	0,01	0,2	
Томская область, РФ Tomsk oblast, Russia	ИНАА INAA	534	0,1	0,005	1,7	[37]
Челябинская область, РФ Chelyabinsk oblast, Russia	ИНАА INAA	н.д. n.d.	0,2	н.д. n.d.	н.д. n.d.	[19]
Иркутская область, РФ Irkutsk oblast, Russia	ИНАА INAA	н.д. n.d.	0,3	н.д. n.d.	н.д. n.d.	[19]
Швеция Sweden	ИСП-МС ICP-MS	114	0,07	0,07	0,4	[38]
Бразилия Brazil	ИНАА	22	0,02	0,002	0,1	[39]
Словения Slovenia	ИСП-МС ICP-MS	17	0,01	0,003	0,03	[40]
Япония Japan	ИНАА INAA	67 муж/men 81 жен/women	0,04 0,1	0,01 0,01	0,4 1,3	[41]
Израиль Israel	ИСП-МС ICP-MS	99	0,1	0,01	0,2	[42]
Ирак Iraq		29	0,3	0,1	0,4	[43]
Финляндия Finland		852	0,3	0,001	140	[44]
Южно-Африканская Республика Republic of South Africa		27 сборных образцов волос 1332 человек 27 collected hair samples of 1332 people	0,2	0,03	2,5	[45]

Дальнейшее исследование, проведенное на территории РБ, было направлено на выяснение геоэкологических факторов, определяющих региональный урановый статус.

Анализ пространственного распределения урана на территории РБ по его содержанию как в накипи, так и в волосах показал значительную неравномерность и четкую согласованность с региональными геоэкологическими условиями (рис. 1).

Платформенная часть РБ. В платформенной части Башкортостана можно выделить две крупные зоны – северную, отличающуюся низким уровнем урана, а также западную, где уровень урана оказался сравнительно высоким.

Северная отрицательная аномалия. Север республики практически по всей площади характеризуется низкими значениями содержания урана. Так, среднее содержание урана в накипи составило 3,9 мг/кг, что ниже фоновое содержание для республики. Средняя концентрация урана в волосах не превышала уровень одноименного показателя по республике и составила 0,04 мг/кг (диапазон значений от 0,003 до 0,256). Полученные результаты закономерны с геологической точки зрения. Именно здесь наиболее широко развиты карбонатно-терригенные породы нижней перми морского генезиса, которые отличаются меньшей радиоактивностью. Карбонатно-терригенными породами сложен северо-восток Башкортостана, на северо-

восточной окраине которого залегают карбонатные породы палеозоя. Обращает внимание, что самая обширная зона минимальных значений урана совпадает с областью максимальной пораженности этой территории поверхностными проявлениями карбонатного карста. Низкий уровень концентраций урана на северо-западе республики приурочен к Камско-Бельскому понижению – области погружения гранито-гнейсового фундамента, который залегает здесь на глубине более 10 км. Увеличение глубины залегания гранитов, отличающихся наиболее высоким содержанием урана – 25 мг на 1 т породы [46], по-видимому, уменьшает доступность исследуемого элемента.

Западная положительная аномалия. Выделенная на западе платформенной части Башкортостана зона является самой крупной по площади положительной урановой аномалией. Среднее содержание урана в накипи здесь оказалось наиболее высоким и составило 15,9 мг/кг, в отдельных населённых пунктах этот показатель достигал максимальных значений для РБ – 61,0 мг/кг.

Изучение уранового статуса жителей было проведено в 5 административных районах, расположенных в границах западной положительной аномалии и охватывающих примерно 3/4 ее территории: Илишевском, Дюртюлинском, Чекмагушевском, Туймазинском, Давлекановском. Во всех исследуемых группах содержание урана превышало его средний уровень и составило 0,07 мг/кг (диапазон значений от 0,002 до 0,294).

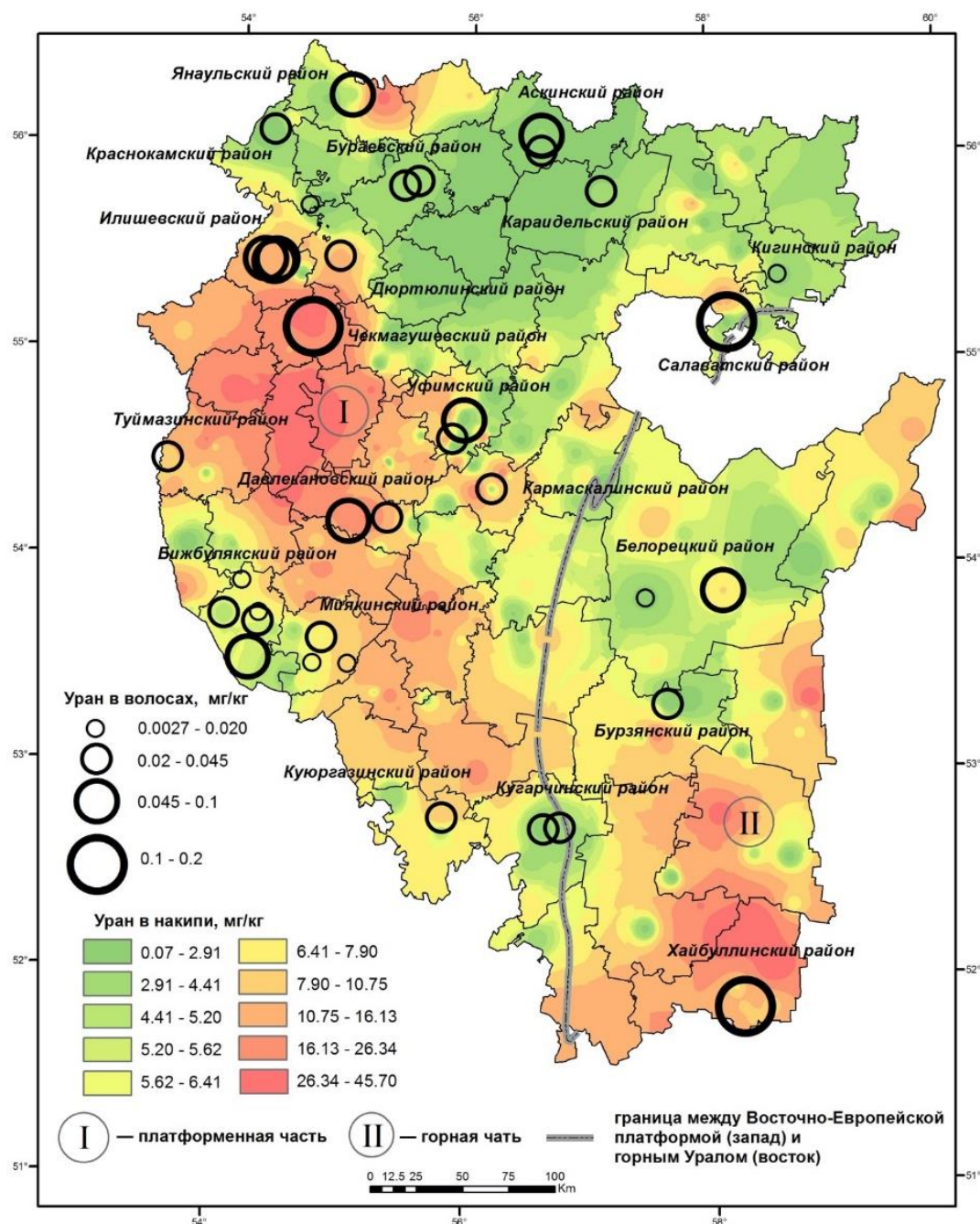


Рис. 1. Карта пространственного распределения урана в накипи питьевых вод и в волосах детей в Республике Башкортостан

Fig. 1. Map of uranium spatial distribution in drinking water scale and hair of children in the Republic of Bashkortostan, mean values for researched settlements

Формирование западной положительной аномалии обусловлено, по-видимому, наличием здесь целого комплекса факторов как природного, так и техногенного характера. Данная территория сложена терригенными осадками континентального генезиса, которые характеризуются относительно большим содержанием урана. Следует отметить широкое распространение пермских красноцветных толщ уфимского яруса. Приуроченные к ним медистые песчаники часто рассматривают как источник урана, меди и других элементов для рудообразующих флюидов [47–49], поэтому названные толщ могут служить одними из

главных ресурсов обогащения ураном водоносных горизонтов.

Обращает внимание совпадение зоны максимальных содержаний урана с положительной структурой гранито-гнейсовых пород кристаллического фундамента, тектонически выделенной как Татарский свод. Проведенные исследования выявили здесь надвиговые дислокации значительной протяженности, к которым приурочены локальные нефтеносные структуры [50]. Наличие тектонических дислокаций повышает доступность элементов-примесей горных пород в связи с нарушением сплошности земной коры и вы-

раженной раздробленностью краевых частей шарьяжных пластин. Кроме того, нефть характеризуется естественной радиоактивностью [51, 52]. По данным литературы, при разработке нефтяных месторождений вместе с нефтью и пластовыми водами на поверхность извлекаются радионуклиды, которые присутствуют и на промышленном оборудовании, что создает опасность для здоровья работников этой отрасли [53, 54].

Нефтедобыча ведется в этой зоне с 1937 г. с открытием крупного Туймазинского месторождения нефти. В 1948 г. здесь впервые начато использование технологии заводнения нефтяных пластов для повышения нефтеотдачи, что повлекло за собой попадание пластовых вод в источники питьевого водоснабжения, их повышенную минерализацию, а также радионуклидное загрязнение, обусловившее особую экологическую напряженность в данном регионе.

В пределах платформенной части Башкортостана по направлению с запада на юго-восток, к зоне Предуральского прогиба, прослеживается тенденция к снижению содержания урана согласно данным анализа накипи питьевых вод, что закономерно с тектонической точки зрения. Предуральский прогиб представляет собой тектоническую структуру, которая образовалась в результате прогибания краевой части Восточно-Европейской платформы под весом шарьинированных на нее с востока складчатых сооружений Уральского орогена [55, 56], поэтому глубина залегания гранито-гнейсового фундамента возрастает в юго-восточном направлении от 2–3 до 16–18 км.

Аналогичная тенденция была обнаружена при изучении уранового профиля жителей: в населенных пунктах, расположенных на юго-востоке платформенной части республики, уровень содержания урана в биопробах жителей оказался преимущественно в пределах низких и минимальных значений при средней концентрации 0,03 мг/кг (диапазон от 0,001 до 0,105).

На юго-западе платформенной части республики обращает внимание совпадение ареола относительно невысоких значений урана как в накипи (5,6 мг/кг), так и в волосах (0,03 мг/кг) с зоной распространения карбонатного карста.

Горная часть РБ. Результаты исследования характеризовались сравнительно низким уровнем урана на севере горной части и его высоким содержанием на юге.

Северная горная часть. Среднее значение урана в накипи данной зоны оказалось в пределах фонового показателя по РБ – 5,9 мг/кг, среднее содержание исследуемого элемента в биопробах, взятых из двух районов (Белорецкий и Бурзянский), также было близким к среднему значению по РБ – 0,06 мг/кг (диапазон от 0,003 до 0,155), что согласуется с данными геологического строения. Здесь, на крыльях Башкирского мегантиклинория, залегают карбонатные толщи палеозоя, в которых расположены преимущественно речные русла, в том числе самая крупная водная артерия республики – река Белая.

Сравнительно большая зона низкого уровня содержания урана, расположенная на севере Зилаирского синклинория, приурочена к наиболее крупному выходу гипербазитов в республике – горам Крака, что соответствует данным литературы о снижении уровня урана в зонах развития ультраосновных пород [57].

Южная горная часть. Исследование, проведенное на юго-восточной окраине РБ, на территории Хайбуллинского района, выявило высокое среднее содержание урана как в накипи – 12,9 мг/кг, а в некоторых пробах более 45 мг/кг, так и в волосах – 0,13 мг/кг (диапазон от 0,009 до 0,411). Формирование южной зоны повышенного уровня урана, по видимому, связано с природно-техногенным влиянием. Данная положительная аномалия приурочена к самой крупной на территории РБ области развития горючих сланцев, характеризующихся повышенным содержанием целого ряда металлов, включая уран. Возможное значение принадлежит также тектоническому фактору: южная положительная урановая аномалия расположена в пределах Магнитогорского синклинория – крупной тектонической структуры, состоящей из многочисленных надвинутых друг на друга шарьяжных пластин, сложенных вулканогенно-осадочными породами палеозоя. Высокая концентрация тектонических дислокаций, как отмечалось ранее, облегчает миграцию урана из горных толщ.

Техногенным фактором, способствующим повышению уровня урана в окружающей среде, является разработка здесь, в Хайбуллинском районе, крупного Бурибаевского медно-колчеданного рудного месторождения.

Таким образом, исследования, осуществленные на территории РБ, продемонстрировали согласованность результатов химического анализа накипи питьевых вод и волос человека. Для уточнения степени соответствия данных показателей выполнен корреляционный анализ.

Корреляционный анализ. Проведенный анализ показал, что содержание U в волосах детей с высокой степенью достоверности (r -Пирсона=0,895, достоверность аппроксимации $R^2=0,801$) зависит от его концентрации в накипи питьевых вод (рис. 2). Результаты корреляционного анализа отражают интенсивность поступления урана в организм человека с питьевой водой. Полученные результаты согласуются с данными литературы о способности волос включать металлы в свою структуру в процессе роста и накапливать их в течение продолжительного срока, являясь конечными продуктами метаболизма [58, 59].

Для определения степени аккумуляции урана организмом человека из питьевой воды был рассчитан КН. Данный показатель рассчитан по содержанию урана в накипи, поскольку последняя с высокой степенью достоверности отражает его содержание в воде (от 0,62 до 0,96) [17, 30–33]. Для удобства сопоставления значений были рассчитаны КК для накипи и волос делением содержания урана в пробах на средний уровень элемента по РБ. Результаты расчетов представлены в табл. 3.

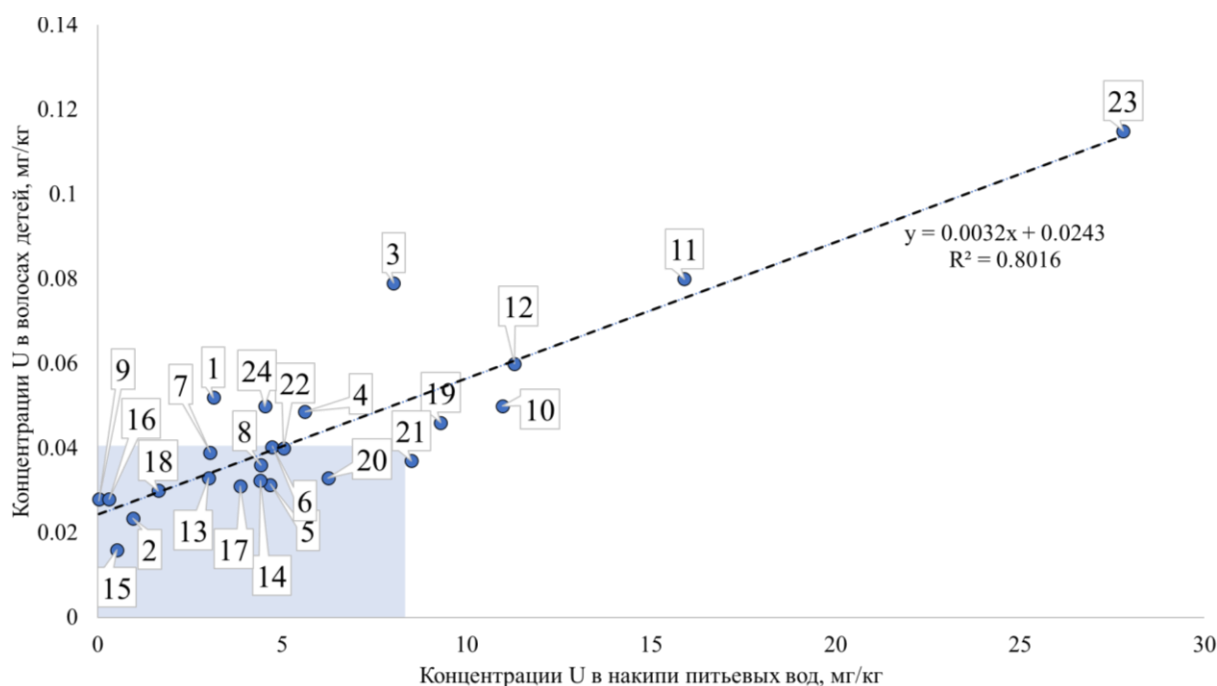


Рис. 2. Корреляционная зависимость концентрации U в волосах детей от его содержания в накипи питьевых вод в РБ, мг/кг ($R^2=0,801$). В синем квадрате – пробы в пределах среднего содержания U по республике. Примечание: Аскинский район: 1. Аскино, 2. Куяштыр; Белорецкий район: 3. Серменево; Бижбулякский район: 4. Аитово, 5. Бижбуляк, 6. Сухоречка; Бураевский район: 7. Бураево, 8. Чишма-Бураево; Бурзянский район: 9. Яумбаево; Давлекановский район: 10. Давлеканово; Илишевский район: 11. Верхнеяркеево, 12. Старокуктово; Караидельский район: 13. Караидель; Кармаскалинский район: 14. Кармаскалы; Кигинский район: 15. Верхние Киги; Краснокамский район: 16. Нефтекамск; Кугарчинский район: 17. Бикбулатово, 18. Мраково; Куюргазинский район: 19. Кумертау; Миякинский район: 20. Киргиз-мияки; Туймазинский район: 21. Октябрьский; Уфимский район: 22. Нижегородка; Чекмагушевский район: 23. Чекмагуш; Янаульский район: 24. Янаул

Fig. 2. Correlation dependence of U concentration in children's hair and its content in the drinking water scale in the Republic of Bashkortostan, ppm ($R^2=0,801$). The samples within U average content in the Republic are in the blue square. Note: Askinsk region: 1. Askino, 2. Kuyashtyr; Beloretsk region: 3. Sermenevo; Bizhbulyaksk region: 4. Aitovo, 5. Bizhbulyak, 6. Sukhorechka; Buraevsk region: 7. Buraevo, 8. Chishma-Buraevo; Burzyansk region: 9. Yaumbaevo; Davlekanovsk region: 10. Davlekanovo; Ilishevsk region: 11. Verkhneyarkeevsk, 12. Starokuktovo; Karaidelsk region: 13. Karaidel; Karmaskalinsk region: 14. Karmaskaly; Kiginsk region: 15. Verkhnie Kigi; Krasnokamsk region: 16. Neftkamsk; Kugarchinsk region: 17. Bikbulatovo, 18. Mrakovo; Kuyurgazinsk region: 19. Kumertau; Miyakinsk region: 20. Kirgiz-miyaki; Tuimazinsk region: 21. Oktyabrsky; Ufimsk region: 22. Nizhegorodka; Chekmagushevsk region: 23. Chekmagush; Yanaulsk region: 24. Yanaul

Согласно данным табл. 3, районы из западной положительной урановой аномалии платформенной части РБ (Туймазинский, Давлекановский, Дюртюлинский, Чекмагушевский, Илишевский), где содержание урана оказалось сравнительно высоким как в накипи, так и в волосах, характеризуются близкими значениями КН.

Различия же коэффициентов концентрации U в накипи и в волосах жителей Салаватского района гипотетически обусловлены поступлением урана в волосы из других источников. В этом районе запланированы дополнительные исследования для выявления источников поступления U в организм человека.

В тройной диаграмме на рис. 3 результаты проб из западной положительной аномалии выделены в отдельную группу, расположенную ближе к оси со значениями концентраций урана в накипи, что свидетельствует о поступлении элемента в организм преимущественно с водой.

В результатах проб из северной платформенной части РБ (Краснокамский, Янаульский, Бураевский, Ас-

кинский районы), которая отличается пониженным содержанием урана в накипи и в волосах (табл. 3), также прослеживается некоторое сходство значений КН, что графически выделяет их в отдельную группу (рис. 3).

Следует отметить, что концентрация урана в волосах жителей не всегда менялась параллельно его содержанию в накипи. Так, в северной горной части РБ (Бурзянский район), содержание исследуемого элемента в волосах было близким к средней концентрации, в то время как содержание в накипи – низким. Вместе с тем КН оказался самым высоким, что указывает на возможность поступления урана из других источников внешней среды, что требует дальнейшего изучения. Аналогичная ситуация на юго-западе платформенной части РБ (Бижбулякский район), где в отдельных населенных пунктах уровень элемента в волосах был выше медианы по республике, несмотря на его близкое к фоновому содержанию в накипи.

Обращают на себя внимание особенности взаимосвязи проб из зоны повышенных значений урана в

накипи и волосах в южной горной части республики (Хайбуллинский район), где КН оказался парадоксально низким. Полученный результат также свидетельствует о возможности других путей поступления урана в организм человека кроме воды. Разработка в этом районе открытым способом крупного рудного

месторождения, упомянутого выше, позволяет предположить, что таким источником является пылевая нагрузка. Такого рода фактор обнаружен в г. Новосибирске при изучении распределения урана в аэрозольных выпадениях [60].

Таблица 3. Коэффициент накопления урана и коэффициенты концентрации урана в накипи и волосах в Республике Башкортостан

Table 3. Uranium accumulation coefficient and uranium concentration coefficient in scale and hair in the Republic of Bashkortostan

Район Region	Населенный пункт Settlement	Коэффициент концентрации U U concentration coefficient		Коэффициент накопления U U accumulation coefficient
		в накипи in scale	в волосах in hair	
Туймазинский Tuimazinsk	Октябрьский Oktyabrsky	1,57	0,60	0,003
Давлекановский Davlekanovsk	Давлеканово Davlekanovo	3,24	1,25	0,003
Дюртюлинский Duryulinsk	Дюртюли Duryuli	1,74	0,95	0,004
Куюргазинский Kuyurgazinsk	Кумертау Kumertau	1,72	0,95	0,004
Чекмагушевский Chekmagushevsk	Чекмагуш Chekmagush	5,15	2,88	0,004
Миякинский Miyakinsk	Киргиз-Мияки Kirgiz-Miyaki	1,16	0,75	0,005
Илишевский Ilishevsk	Верхнеяркеево Verkhneyarkeevovo	2,94	2,00	0,005
	Старокуктово Starokuktovo	2,09	1,50	0,005
Бижбулякский Bizhbulyaksk	Бижбуляк Bizhbulyak	0,86	0,79	0,007
Кармаскалинский Karmaskalinsk	Кармаскалы Karmaskaly	0,82	0,81	0,007
Хайбуллинский Khaibullinsky	Акъяр Akyar	3,24	3,25	0,007
Кугарчинский Kugarchinsk	Бикбулатово Bikbulatovo	0,71	0,75	0,008
Уфимский Ufinsk	Нижнегородка Nizhegorodka	0,93	1,00	0,008
Бураевский Buraevsk	Чишма-Бураево Chishma-Buraevo	0,82	0,90	0,008
Бижбулякский Bizhbulyaksk	Сухоречка Sukhorechka	0,87	1,01	0,009
	Аитово Aitovo	1,04	1,22	0,009
Белорецкий Beloretsk	Серменево Sermenevo	1,49	1,98	0,010
Караидельский Karaidelsk	Караидель Karaidel	0,56	0,75	0,010
Янаульский Yanaulsk	Янаул Yanaul	0,84	1,25	0,011
Бураевский Buraevsk	Бураево Buraevo	0,56	0,98	0,013
Кугарчинский Kugarchinsk	Мраково Mrakovo	0,30	0,75	0,018
Аскинский Askinsk	Аскино Askino	0,58	1,78	0,023
	Куяштыр Kuyashtyr	0,18	0,59	0,025
Кигинский Kiginsk	Верхние Киги Verkhnie Kigi	0,10	0,33	0,025
Уфимский Ufinsk	Уфа Ufa	0,34	1,20	0,026
Салаватский Salavatsk	Малояз Maloyaz	0,40	4,84	0,089
Краснокамский Krasnokamsk	Нефтекамск Neftekamsk	0,06	0,75	0,100
Бурзянский Burzyansk	Яумбаево Yaumbaevovo	0,01	0,70	0,700

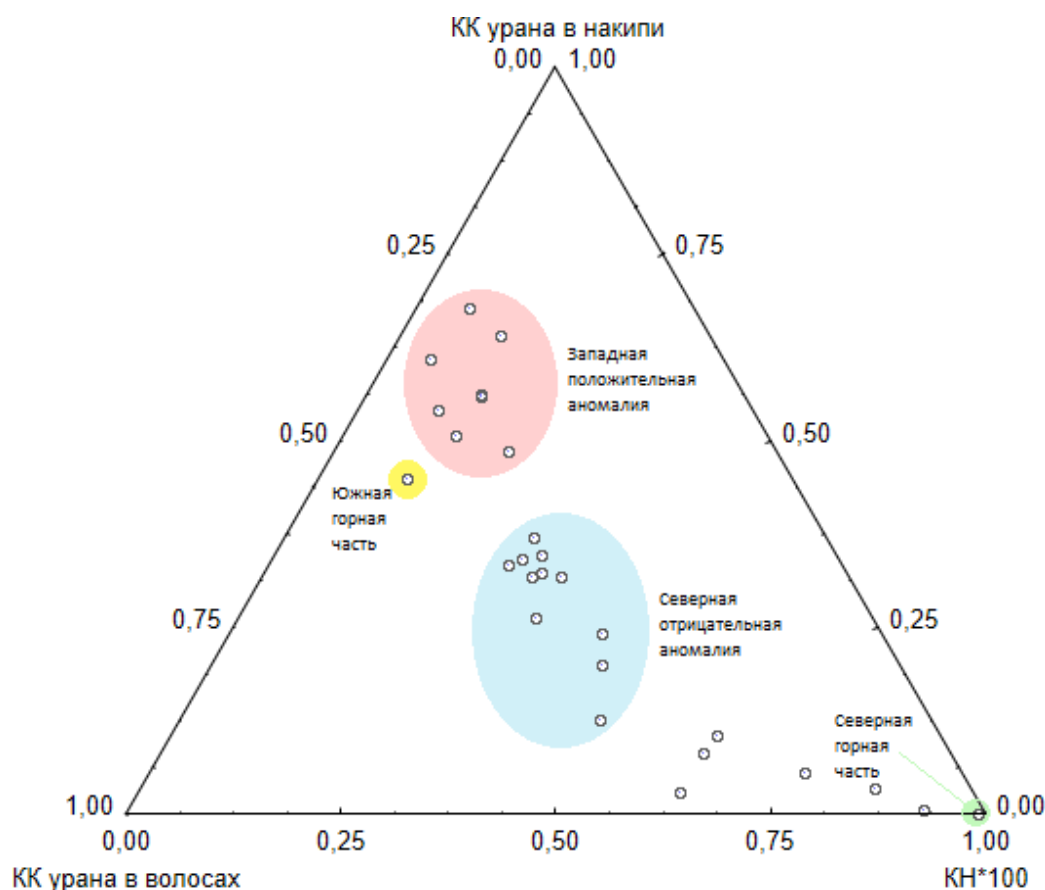


Рис. 3. Тройная диаграмма коэффициента концентрации U в накипи, коэффициента концентрации U в волосах и коэффициента накопления U

Fig. 3. Ternary diagram of U concentration coefficient in scale, U concentration coefficient in hair and U accumulation coefficient

Обсуждение

Согласно полученным данным о закономерностях распределения урана на территории РБ, в оценке регионального уранового статуса следует принимать во внимание целый ряд геоэкологических факторов, включая природные и техногенные. Среди природных факторов важная роль принадлежит литологическим особенностям: в зонах развития карбонатных толщ и ультраосновных магматических пород уровень урана сравнительно ниже, в то время как осадочные отложения континентального происхождения (красноцветные песчаники), магматические породы кислого состава (граниты), а также такие метаморфические породы, как горючие сланцы, характеризуются более высокими содержаниями урана. Наиболее богатым источником урана в природной среде являются граниты, поэтому в формировании регионального уранового статуса имеет значение глубина залегания гранито-гнейсового фундамента, с увеличением которой доступность урана в окружающей среде снижается. Следует учитывать гидрогеологический фактор и характер пород в зоне питания грунтовых вод. Важная роль принадлежит также тектоническим дислокациям, обуславливающим нарушение сплошности земной коры и милонитизацию краевых частей шарьяжных пластин, что повышает миграцию урана. Среди техногенных факторов имеет

значение разработка нефтяных и рудных месторождений.

Следует подчеркнуть, что оценка регионального уранового профиля требует комплексного анализа перечисленных факторов, поскольку их взаимное влияние может носить как усиливающий, так и нивелирующий характер. Так, в формировании наиболее крупной положительной урановой аномалии на западе республики, по-видимому, имеет значение сочетание нескольких однонаправленных природных и техногенных факторов: широкое площадное развитие красноцветных пермских песчаников, сравнительно меньшая глубина залегания гранито-гнейсового фундамента, наличие тектонических дислокаций и разработка нефтяных месторождений. Обнаруженная в горной части республики южная положительная аномалия также обусловлена влиянием комплекса природно-техногенных факторов – наличие здесь зоны развития горючих сланцев и нарушение сплошности земной коры, связанной с высокой концентрацией тектонических дислокаций и добычей медно-колчеданных руд. Вместе с тем север горной части Башкортостана, где также имеют место тектонические нарушения и ведется разработка месторождений, характеризуется преимущественно низким уровнем урана, что может быть обусловлено выходами карбонатных отложений и гипербазитов.

По результатам исследования, включая корреляционный анализ, основным источником поступления урана в организм человека является питьевая вода. Волосы человека, учитывая их депонирующую способность, представляют собой информативный биоматериал для оценки интенсивности поступления данного химического элемента из окружающей среды, урановый статус которой в свою очередь определяет геоэкологическими особенностями региона.

Полученные данные о более высоком содержании урана в волосах детей, проживающих в Башкортостане, по сравнению с его концентрацией в волосах детей других регионов и его прямой зависимости от концентрации в накипи питьевых вод свидетельствуют о значимости контроля качества питьевой воды.

Заключение

Результаты исследования показали, что геоэкологические условия местности имеют ведущее значение в формировании регионального уранового статуса. Установленная прямая связь между содержанием урана в накипи питьевых вод и в волосах жителей, а также четкая согласованность пространственного распределения урана с геоэкологическими условиями местности отражают высокую информативность дан-

ных методов исследования для оценки регионального уранового статуса. Вместе с тем комплексный анализ геоэкологических факторов (литологический, геоморфологический, тектонический, гидрогеологический и техногенный) позволяет прогнозировать особенности регионального уранового профиля. Проведенный корреляционный анализ подтвердил прямую зависимость содержания U в волосах детей от его концентрации в накипи питьевых вод, что свидетельствует о ведущей роли питьевой воды в поступлении урана в организм человека.

Учитывая выявленный более высокий уровень содержания урана в волосах жителей Башкортостана по сравнению с его концентрацией в волосах жителей ряда других регионов РФ и мира, а также способность данного химического элемента к кумуляции в организме, особую актуальность приобретает изучение влияния уранового статуса на состояние здоровья населения. Полученные результаты могут служить теоретической базой для выяснения биологической роли урана и решения фундаментальной проблемы связи геоэкологии и здоровья человека.

Отбор и анализ волос детей, и последующая обработка данных выполнены в рамках реализации гранта Российского научного фонда (проект № 22-27-00748).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Siegel M., Selinus O., Finkelman R. Practical applications of medical geology. – Springer Nature Switzerland AG, 2021. – 932 p. URL: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-53893-4> (дата обращения 15.06.2023).
2. Selinus O., Centeno J.A., Finkelman R.B. Medical geology – a regional synthesis. – Dordrecht, Heidelberg, London, New York: Springer, 2010. – 321 p.
3. Рихванов Л.П., Барановская Н.В., Судыко А.Ф. Химические элементы в организме человека как основа для реализации идей медицинской геологии // Горный журнал. 2013. – № 3. – С. 37–42.
4. Hasan SE. Medical Geology // Encyclopedia of Geology. – 2021. – № 684–702. DOI: 10.1016/B978-0-12-409548-9.12523-0.
5. Ibaraki M., Mori H. Progress in medical geology. – Newcastle upon Tyne: Cambridge Scholars Publishing, 2017. – 234 p.
6. Volfson I.F., Paul W., Pechenkin I.G. Geochemical anomalies: Sickness and health // Man and the Geosphere (Earth Sciences in the 21st Century). – New York: Nova Science Publishers, 2010. – P. 69–113.
7. Очерки геохимии человека: монография / Н.В. Барановская, Л.П. Рихванов, Т.Н. Игнатова, Д.В. Наркович, О.А. Денисова. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2015. – 378 с.
8. Язиков Е.Г., Рихванов Л.П., Шатилов А.Ю. Методика комплексной эколого-геохимической оценки территорий для решения геологических задач // Материалы региональной конференции геологов Сибири, Дальнего востока и Северо-востока России. – Томск, 2000. – Т. 2. – С. 246–248.
9. Historical aspects of medical geology / I. Farkhutdinov, L. Farkhutdinova, A. Zlobina, A. Farkhutdinov, I. Volfson, I. Matveenko // Earth Sciences History. – 2020. – V. 39. – № 1. – P. 172–183. DOI: 10.17704/1944-6187-39.1.172.
10. Геохимические особенности солевых образований питьевых вод Южного Казахстана / Б.У. Шарипова, А.А. Какабаев, Н.В. Барановская, Ш.Ж. Арынова, Н.П. Корогод // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333. – № 7. – С. 137–148. DOI: <https://doi.org/10.18799/24131830/2022/7/3621>.
11. Li P., Wu J. Medical geology and medical geochemistry: an editorial introduction // Expo Health. – 2022. – № 14. – P. 217–218. URL: <https://doi.org/10.1007/s12403-022-00479-z> (дата обращения 15.06.2023).
12. Рихванов Л.П. Общие и региональные проблемы радиоэкологии. – Томск: Изд-во ТПУ, 1997. – 384 с.
13. Cohtem C.R., Lappenbuch W.L. Occurrence of uranium in drinking water in US // Health Phys. – 1983. – V. 45. – № 1. – P. 89–99. DOI: 10.1097/00004032-198307000-00009
14. Редкоземельные и радиоактивные (Th, U) элементы в компонентах природной среды на территории Томской области / Н.В. Барановская, Е.В. Агеева, Б.Р. Соколов, Д.В. Наркович, О.А. Денисова, Т.В. Матковская // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 2. – С. 17–28. DOI: 10.18799/24131830/2020/2/2477.
15. Uranium in drinking water: a public health threat / G. Björklund, Yu. Semenova, L. Pivina, M. Dadar, Md M. Rahman, J. Aarseth, S. Chirumbolo // Arch. Toxicol. – 2020. – № 94. – P. 1551–1560.
16. Carvalho F.P. Uranium mining legacy and radiation protection // Rad. Applic. – 2018. – V. 3. – № 1. – P. 1–6. DOI: 10.21175/RadJ.2018.01.001.
17. Арынова Ш. Элементный состав солевых образований из природных пресных вод как индикатор экологической безопасности водопользования: автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – Томск, 2017. – 22 с.
18. Геохимические особенности радиоактивных элементов в солевых отложениях питьевых вод Северного Казахстана / Г.Е. Байкенова, Н.В. Барановская, А.А. Какабаев, Р.И. Берсимбаев // Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека: материалы VI Международной конференции. – Томск: Изд-во ТПУ, 2021. – Т. 1. – С. 72–75.
19. Агеева Е.В. Редкоземельные и радиоактивные (Th, U) элементы в компонентах природной среды как индикаторы эколого-геохимических обстановок (на примере Томской и Кемеровской областей): автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – Томск, 2022. – 22 с.
20. Winde F., Erasmus E.B., Geipel G. Uranium contaminated drinking water linked to leukaemia – revisiting a case study from South Africa taking alternative exposure pathways into account // Science of the Total Environment. – 2017. – № 574. – P. 400–421.
21. Chronic ingestion of uranium in drinking water: a study of kidney bioeffects in humans / M.L. Zamora, B.L. Tracy, J.M. Zielinski, D.P. Meyerhof, M.A. Moss // Toxicol. Sci. – 1998. – V. 43. – № 1. – P. 68–77.
22. Groundwater uranium and cancer incidence in South Carolina / S.E. Wagner, J.B. Burch, M. Bottai, R. Puett, D. Porter, S. Bolick-Aldrich, T. Temples, R.C. Wilkerson, J.E. Vena, J.R. Hébert //

- Cancer Causes Control. – 2011. – № 22. – P. 41–50. URL: <https://doi.org/10.1007/s10552-010-9669-4> (дата обращения 15.06.2023).
23. Impact of environmental radiation on the incidence of cancer and birth defects in regions with high natural radioactivity / A. Zlobina, I. Farkhutdinov, F.P. Carvalho, N. Wang, T. Korotchenko, N. Baranovskaya, A. Farkhutdinov // International Journal of Environmental Research and Public Health. – 2022. – V. 19. – № (14):8643. URL: <https://doi.org/10.3390/ijerph19148643> (дата обращения 15.06.2023).
24. Heavy metal uranium affects the brain cholinergic system in rat following sub-chronic and chronic exposure / H. Bensoussan, L. Grancolas, B. Dhieux-Lestaevl, O. Delissen, C.M. Vacher, I. Dublineau, P. Voisin, P. Gourmelon, M. Taouis, P. Lestaevl // Toxicology. – 2009. – V. 261. – № 1–2. – P. 59–67. DOI: 10.1016/j.tox.2009.04.054.
25. Миняйло Л. Элементный состав волос жителей городов Северо-Западной Сибири с различной очисткой питьевой воды // Экология человека. – 2019. – № 11. – С. 4–11. DOI: 10.33396/1728-0869-2019-11-4-11.
26. Корчина Т.Я. Корреляционные связи между концентрацией химических элементов в волосах аборигенов Тюменского севера и их содержанием в природных водах региона // Вестник восстановительной медицины. – 2008. – № 5А (28). – С. 38–41.
27. Hair analysis as an indicator of exposure to uranium / K. Kehagia, S. Bratakos, M. Kolovou, C. Potiridis // Radiation Protection Dosimetry. – 2010. – V. 144. – № 1–4. – P. 423–426. DOI: 10.1093/rpd/ncq324
28. Human hair radioactivity in the Chernobyl area / A.A. Kist, R.I. Radyuk, L.I. Zhuk, V.P. Pikul, A.D. Belyaev // J. Alloys Compd. – 1994. – V. 213/214. – P. 81–85.
29. A survey of uranium and thorium background levels in water, urine, and hair and determination of uranium enrichments by ICP-MS / A.H. Mohagheghi, S.T. Shanks, J.A. Zigmund, G.L. Simmons, S.L. Ward // Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. – 2005. – V. 263. – № 1. – P. 189–195.
30. Uranium in man-made carbonates on the territory of Ufa / I.M. Farkhutdinov, R.R. Khayrullin, B.R. Soktoev, A.N. Zlobina, E.I. Chesalova, A.M. Farkhutdinov, A.V. Tkachev // Journal of Mining Institute. – 2023. – P. 1–12. URL: <https://doi.org/10.31897/PMI.2023.4> (дата обращения 15.06.2023).
31. Монголина Т., Барановская Н., Соктоев Б. Элементный состав солевых отложений питьевых вод Томской области // Известия Томского политехнического университета. – 2011. – Т. 319. – № 1. – С. 204–211.
32. Язиков Е.Г., Рихванов Л.П., Барановская Н.В. Индикаторная роль солевых образований в воде при геохимическом мониторинге // Известия вузов. Геология и разведка. – 2004. – № 1. – С. 67–69.
33. Evaluation of drinking water according to geochemical composition of its salt deposition / L.P. Rikhsanov, N.V. Baranovskaya, B.R. Soktoev, T.A. Mongolina // Environmental Engineering: Proceedings of 8th International Conference. – Vilnius, Lithuania, May 19–20, 2011. – P. 337–342.
34. Element analysis of biological materials. Current problems and techniques with special reference to trace elements. Ap. II. Technical reports series / V. Fassel, V. Guinn, W. Haas, K. Hambidge, E. Hamilton, J. Hoste. – Vienna: IAEA, 1980. – № 197. – P. 351–367.
35. Судыко А.Ф. Определение урана, тория, скандия и некоторых редкоземельных элементов в двадцати четырех стандартных образцах сравнения инструментальным нейтронно-активационным методом // Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека: материалы V Международной конференции. – Томск: STT, 2016. – С. 620–624.
36. Соктоев Б.Р., Рихванов Л.П., Арынова Ш.Ж. Естественные радиоактивные элементы (Th, U) в солевых отложениях природных пресных вод // Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека: Материалы V Международной конференции. – Томск, 2016. – С. 599–603.
37. Наркович Д.В. Элементный состав волос детей как индикатор природно-техногенной обстановки территории (на примере Томской области): автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – Томск, 2012. – 24 с.
38. Rodushkin I., Axelsson M.D. Application of double focusing sector field ICP-MS for multielement characterisation of human hair and nails. P. II A study of the inhabitants of northern Sweden // Sci. Tot. Environment. – 2000. – № 262. – P. 21–36. DOI: 10.1016/S0048-9697(00)00531-3.
39. Determination of Uranium in human head hair of a Brazilian population group by epithermal neutron activation analysis / A.U. Akamine, M.A. Duchon Silva, M. Saiki, M.B.A. Vasconcellos, S.L. de Andrade, R. Fulfaro // J Radioanal Nucl. Chem. – 2007. – V. 271. – P. 607–609. DOI: 10.1007/s10967-007-0315-x.
40. Byrne A.R., Benedick L. Uranium content of blood, urine and hair of exposed and non exposed persons determined by radiochemical neutron activation analysis with emphasis on quality control // Sci Total Environ. – 1991. – № 107. – P. 143–157.
41. Multielement neutron activation analysis of human scalp hair. A local population survey in the Tokyo metropolitan area / A. Imahori, I. Fukushima, S. Shiobara, Y. Yanagida, K. Tomura // J Radioanal Chem. – 1997. – V. 52. – № 1. – P. 167–180. DOI: 10.1007/BF02517711.
42. Determination of Uranium in human hair by acid digestion and FIAS-ICPMS / R. Gonnens, R. Kol, Y. Laichter, L. Halicz, A. Lorber, Z. Karpas // J Radioanalytical Nucl. Chem. – 2000. – V. 243. – № 2. – P. 559–562. DOI: 10.1023/A:1016031726512.
43. Uranium and other contaminants in hair from the parents of children with congenital anomalies in Fallujah, Iraq / S. Alaani, M. Tafash, C. Busby, M. Hamdan, E. Blaurock-Busch // ConflHealth. – 2011. – V. 5. – № 15. URL: <https://doi.org/10.1186/1752-1505-5-15> (дата обращения 15.06.2023).
44. The mean concentration of Uranium in drinking water, urine and hair of the occupationally unexposed Finnish working population / M. Muikku, M. Puhakainen, T. Heikinen, T. Ilus // Health Phys. – 2009. – V. 96. – № 6. – P. 646–654. DOI: 10.1097/01.HP.0000345026.98668.c4.
45. Human exposure to uranium in South African gold mining areas using barber-based hair sampling / F. Winde, G. Geipel, C. Espina, J. Schu'z // PLoS ONE. – 2019. – V. 14. – № 6. – e0219059. URL: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0219059> (дата обращения 15.06.2023).
46. Станцо В.В., Черненко М.Б. Популярная библиотека химических элементов. – М.: Наука, 1983. – Кн. I. – 574 с.
47. Геохимические особенности и условия образования медистых песчаников Оренбургского Предуралья / А.В. Волков, И.А. Новиков, А.А. Разумовский, К.Ю. Мурашов, Н.В. Сидорова // Литосфера. – 2018. – Т. 18. – № 4. – С. 593–606.
48. Контарь Е.С. Геолого-промышленные типы месторождений меди, цинка, свинца на Урале (геологические условия размещения, история формирования, перспективы). – Екатеринбург: УГТУ, 2013. – 199 с.
49. Dahlkamp F.J. Geology of uranium deposits. – Berlin: Springer, 1993. – 460 p.
50. Камалетдинов М.А. К 65-летию открытия девонской нефти Волго-Урала // Георесурсы. – 2009. – № 1. – С. 46–48.
51. Соболев И.С. Методы радиогеохимии при наземных поисках месторождений нефти и газа // Известия Томского политехнического университета. – 2007. – Т. 311. – № 1. – С. 90–96.
52. Reddy A.S., Rao N.V. Radiation anomaly correlation helpful in Krishna Godavari basin // Oil and Gas Journal. – 2002. – April 15. – P. 38–42.
53. Al-Masri M.S., Aba A. Distribution of scale containing NORM in different oilfields equipment // Appl. Radiat. Isotopes. – 2005. – V. 63. – P. 457–463.
54. Khalid Al Nabhani, Faisal Khan, Ming Yang. Technologically enhanced naturally occurring radioactive materials in oil and gas production: a silent killer // Process Safety and Environmental Protection. – 2016. – V. 99. – P. 237–247. URL: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2015.09.014> (дата обращения 15.06.2023).
55. Камалетдинов М.А. Покровные структуры Урала. – М.: Наука, 1974. – 230 с.
56. Геологическая карта Башкортостана (масштаб 1:600000) / под ред. М.А. Камалетдинова. – М.: Главное управление геодезии и картографии при Совете Министров СССР, 1980. – 50 с.
57. Григорьев Н.А. Распределение химических элементов в верхней части континентальной коры. – Екатеринбург: УрО РАН, 2009. – 383 с.
58. Using human hair and nails as biomarkers to assess exposure of potentially harmful elements to populations living near mine waste dumps / L. Nakaona, K.K. Maseka, E.M. Hamilton, M.J. Watts //

- Environ Geochem Health. – 2020. – № 42. – P. 1197–1209. URL: <https://doi.org/10.1007/s10653-019-00376-6> (дата обращения 15.06.2023).
59. Heavy metals in fish, rice, and human hair and health risk assessment in Wuhan city, central China / M.U. Ali, Ch. Wang, Y. Li, R. Li, Sh. Yang, L. Ding, L. Feng, B. Wang, P. Li, M.H. Wong // Environmental Pollution. – 2023. – V. 328. – № 12160. URL: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.121604> (дата обращения 15.06.2023).
60. Анализ распределения урана в аэрозольных выпадениях на территории города Новосибирска / Л.А. Дорохова, Д.В. Юсупов, А.С. Торопов, В.Ф. Рапута, Л.М. Павлова, В.И. Радомская, А.Ф. Судыко, Н.В. Барановская // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2023. – Т. 334. – № 1. – С. 7–18.

Поступила: 24.06.2023 г.

Прошла рецензирование: 17.07.2023 г.

Информация об авторах

Злобина А.Н., кандидат геолого-минералогических наук, старший преподаватель кафедры геологии, гидрометеорологии и геоэкологии факультета наук о Земле и туризма Уфимского университета науки и технологии.

Фархутдинова Л.М., доктор медицинских наук, профессор кафедры терапии и общей врачебной практики с курсом гериатрии Башкирского государственного медицинского университета.

Фархутдинов И.М., кандидат геолого-минералогических наук, главный менеджер ООО «РН-БашНИПИнефть»; ученый секретарь Государственного геологического музея им. В.И. Вернадского РАН.

Беляновская А.И., кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории седиментологии и эволюции палеобиосферы Тюменского государственного университета.

Барановская Н.В., доктор биологических наук, профессор отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Чесалова Е.И., научный сотрудник Государственного геологического музея им. В.И. Вернадского РАН.

Фархутдинов А.М., кандидат геолого-минералогических наук, исследователь университета Сержи-Париж.

Хайрулина Л.А., старший преподаватель кафедры геологии, гидрометеорологии и геоэкологии факультета наук о Земле и туризма Уфимского университета науки и технологии.

Крестьянникова Е.В., лаборант-исследователь центра изотопной биогеохимии Тюменского государственного университета; младший научный сотрудник лаборатории хроматографии и элементного анализа Института фармации Тюменского государственного медицинского университета; старший преподаватель строительного института Тюменского индустриального университета.

UDC 550.46, 550.47

PATTERNS OF THE REGIONAL URANIUM STATUS FORMATION ON THE EXAMPLE OF THE REPUBLIC OF BASHKORTOSTAN

Anastasia N. Zlobina¹,
anastasiyazl@mail.ru

Leila M. Farkhutdinova²,
farkhutdinova@gmail.com

Iskhak M. Farkhutdinov^{3,4},
iskhakgeo@gmail.com

Alexandra I. Belyanovskaya⁵,
alexandra.belyanovskaya@outlook.com

Natalia V. Baranovskaya⁶,
nata@tpu.ru

Elena I. Chesalova⁴,
chesalova_ei@mail.ru

Anvar M. Farkhutdinov⁷,
anvar.farkhutdinov@cyu.fr

Larisa A. Khayrulina¹,
artthemix@mail.ru

Elizaveta V. Krestyannikova^{5,8,9},
li3452@yandex.ru

¹ Ufa University of Science and Technology,
32, Zaki Validy street, Ufa, 450076, Russia.

² Bashkir State Medical University,
3, Lenin street, Ufa, 450000, Russia.

³ OOO RN-BashNIPneft,
3/1, Bekhtereva street, Ufa, 450103, Russia.

⁴ Vernadsky State Geological Museum of the Russian Academy of Sciences,
11/11, Mokhovaya street, Moscow, 103009, Russia.

⁵ Tyumen State University,
6, Volodarsky street, Tyumen, 625003, Russia.

⁶ National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

⁷ CY Cergy Paris University,
33, De Port avenue, Cergy-Pontoise, 95000, France.

⁸ Tyumen State Medical University,
54, Odesskaya street, Tyumen, 625023, Russia.

⁹ Tyumen Industrial University,
38, Volodarsky street, Tyumen, 625000, Russia.

The relevance of the research. Uranium is a radioactive, carcinogenic, toxic element that can be accumulated in human body and cause various pathologies (risk of kidney dysfunction, development of leukemia, colorectal cancer etc.). This determines the relevance of studying the patterns of this chemical element distribution in the living environment. Drinking water is the main source of uranium for the human body. This fact can be confirmed by calculating the accumulation coefficient and correlation analysis, which showed a high dependence of uranium concentration in hair on its content in drinking water scale. The method for assessing the uranium status of a territory, including geochemical, lithological, hydrogeological, tectonic analyses, and the study of technogenic factors, makes it possible to fairly accurately determine the main sources of uranium feeding of drinking water.

The main aim: to assess the significance of geoecological factors on the territory of the Republic of Bashkortostan in the formation of the regional uranium status based on the study of uranium content in drinking water and hair of residents.

Methods. Uranium concentration in drinking water scale and the hair of children was studied using instrumental neutron activation analysis applying the research nuclear reactor IRT-T TPU. For data processing, the Statistica 10 and Microsoft Excel 2013 software packages were used. A map of uranium spatial distribution was built using the ArcGIS 10.2 software in the Geostatistical Analyst module applying the inverse distance weighting method.

Results. On the territory of the Republic of Bashkortostan, there is a wide range of uranium values both in drinking water scale (range from 0,01 to 61,0 mg/kg) and in hair of residents (range from 0,001 to 0,411 mg/kg). The average content of uranium in drinking water scale (515 samples) was 5,4 mg/kg and in hair (182 samples) was 0,04 mg/kg. Uranium spatial distribution is in clear agreement with the geoecological conditions of the area. Zones of increased uranium concentration in scale and hair are distinguished, where uranium content is higher than the background value in the republic: western platform and southern mountain zones. Along with positive anomalies, there are negative ones, where the level of the element is below the average: the northern platform and northern mountain zones. Uneven uranium distribution is explained by both natural (a wide variety of rocks, hydrogeological and tectonic factors) and technogenic factors (development of oil and ore deposits). The conducted correlation analysis showed a direct dependence of U content in children's hair on its

concentration in drinking water scale ($R^2=0,8$), which indicates the leading role of drinking water in uranium intake into human body. Considering the revealed higher level of uranium in hair of the inhabitants of Bashkortostan compared to a number of other regions of the Russian Federation and the world, as well as the ability of this chemical element to be accumulated in the body, the study of the uranium status influence on health of the population is of particular relevance. The results obtained can serve as a theoretical basis for elucidating uranium biological role and solving the fundamental problem of the relationship between geoecology and human health.

Key words:

natural radioactivity, scale of drinking water, chemical composition of hair, geochemistry, geoecology.

Sampling and analysis of children's hair, and data processing were carried out within the framework of implementation of the Russian Science Foundation grant (project no. 22-27-00748).

REFERENCES

- Siegel M., Selinus O., Finkelman R. *Practical applications of medical geology*. Springer Nature Switzerland AG, 2021. 932 p. Available at: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-53893-4> (accessed 15 June 2023).
- Selinus O., Centeno J.A., Finkelman R.B. *Medical geology – a regional synthesis*. Dordrecht, Heidelberg, London, New York, Springer, 2010. 321 p.
- Rikhvanov L.P., Baranovskaya N.V., Sudyko A.F. Chemical elements in the human body as the basis for implementing the ideas of medical geology. *Gorny zhurnal*, 2013, no. 3, pp. 37–42. In Rus.
- Hasan S.E. Medical Geology. *Encyclopedia of Geology*, 2021, pp. 684–702. DOI: 10.1016/B978-0-12-409548-9.12523-0.
- Ibaraki M., Mori H. *Progress in medical geology*. Newcastle upon Tyne, Cambridge Scholars Publ., 2017. 234 p.
- Volfson I.F., Paul W., Pechenkin I.G. Geochemical anomalies: sickness and health. *Man and the Geosphere (Earth Sciences in the 21st Century)*. New York, Nova Science Publ., 2010. pp. 69–113.
- Baranovskaya N.V., Rikhvanov L.P., Ignatova T.N., Narkovich D.V., Denisova O.A. *Ocherki geokhimii cheloveka: monografiya* [Essays on human geochemistry. Monography]. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ. house, 2015. 378 p.
- Yazikov E.G., Rikhvanov L.P., Shatilov A.Yu. Metodika kompleksnoy ekologo-geokhimicheskoy otsenki territoriy dlya resheniya geologicheskikh zadach [Methodology of complex ecological and geochemical assessment of territories for solving geological problems]. *Materialy regionalnoy konferentsii geologov Sibiri, Dalnego vostoka i Severo-vostoka Rossii* [Materials of the regional conference of geologists of Siberia, the Far East and the North-East of Russia]. Tomsk, 2000. Vol. 2, pp. 246–248.
- Farkhutdinov I., Farkhutdinova L., Zlobina A., Farkhutdinov A., Volfson I., Matveenko I. Historical aspects of medical geology. *Earth Sciences History*, 2020, vol. 39, no. 1, pp. 172–183. DOI: 10.17704/1944-6187-39.1.172.
- Sharipova B.U., Kakabaev A.A., Baranovskaya N.V., Arynova Sh.G., Kogorod N.P. Geochemical features of salt formations of drinking waters of Southern Kazakhstan. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, no. 7, pp. 137–148. In Rus. DOI: <https://doi.org/10.18799/24131830/2022/7/3621>.
- Li P., Wu J. Medical geology and medical geochemistry: an editorial introduction. *Expo Health*, 2022, no 14, pp. 217–218. Available at: <https://doi.org/10.1007/s12403-022-00479-z> (accessed 15 June 2023).
- Rikhvanov L.P. *Obshchie i regionalnye problemy radioekologii* [General and regional problems of radioecology]. Tomsk, TPU Publ. house, 1997. 384 p.
- Cohtern C.R., Lappenbuch W.L. Occurrence of uranium in drinking water in US. *Health Phys.*, 1983, vol. 45, no. 1, pp. 89–99. DOI: 10.1097/00004032-198307000-00009.
- Baranovskaya N.V., Ageeva E.V., Soktoev B.R., Narkovich D.V., Denisova O.A., Matkovskaya T.V. Rare earth and radioactive (Th, U) elements in the components of the natural environment in the Tomsk region. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 2, pp. 17–28. In Rus. DOI: 10.18799/24131830/2020/2/2477.
- Björklund G., Semenova Yu., Pivina L., Dadar M., Rahman Md M., Aarseth J., Chirumbolo S. Uranium in drinking water: a public health threat. *Arch. Toxicol.*, 2020, no. 94, pp. 1551–1560.
- Carvalho F.P. Uranium mining legacy and radiation protection. *Rad. Applic.*, 2018, vol. 3, no. 1, pp. 1–6. DOI: 10.21175/RadJ.2018.01.001.
- Arynova S.H. *Elementny sostav solevykh obrazovaniy iz prirodnikh presnykh vod kak indikator ekologicheskoy bezopasnosti vodopolzovaniya*. Avtoreferat Dis. Kand. nauk [The elemental composition of salt formations from natural fresh waters as an indicator of environmental safety of water use. Cand. Diss. Abstract]. Tomsk, 2017. 22 p.
- Baykenova G.E., Baranovskaya N.V., Kakabaev A.A., Bersimbaev R.I. Geokhimicheskie osobennosti radioaktivnykh elementov v solevykh otlozheniyakh pit'evykh vod Severnogo Kazakhstana [Geochemical features of radioactive elements in salt deposits of drinking waters of Northern Kazakhstan]. *Radioaktivnost i radioaktivnye elementy v srede obitaniya cheloveka. Materialy VI Mezhdunarodnoy konferentsii* [Radioactivity and radioactive elements in human habitat. Proc. of the VI International Conference]. Tomsk, TPU Publ. house, 2021. Vol. 1, pp. 72–75.
- Ageeva E.V. Redkozemelnye i radioaktivnye (Th, U) elementy v komponentakh prirodnoy sredy kak indikatory ekologo-geokhimicheskikh obstanovok (na primere Tomskoy i Kemerovskoy oblastey). Avtoreferat Dis. Kand. nauk [Rare earth and radioactive (Th, U) elements in the components of the natural environment as indicators of ecological and geochemical conditions (on the example of the Tomsk and Kemerovo regions). Cand. Diss. Abstract]. Tomsk, 2022. 22 p.
- Winde F., Erasmus E.B., Geipel G. Uranium contaminated drinking water linked to leukaemia – revisiting a case study from South Africa taking alternative exposure pathways into account. *Science of the Total Environment*, 2017, no. 574, pp. 400–421.
- Zamora M.L., Tracy B.L., Zielinski J.M., Meyerhof D.P., Moss M.A. Chronic ingestion of uranium in drinking water: a study of kidney bioeffects in humans. *Toxicol. Sci.*, 1998, vol. 43, no. 1, pp. 68–77.
- Wagner S.E., Burch J.B., Bottai M., Puett R., Porter D., Bolick-Aldrich S., Temples T., Wilkerson R.C., Vena J.E., Hébert J.R. Groundwater uranium and cancer incidence in South Carolina. *Cancer Causes Control*, 2011, no. 22, pp. 41–50. Available at: <https://doi.org/10.1007/s10552-010-9669-4> (accessed 15 June 2023).
- Zlobina A., Farkhutdinov I., Carvalho F.P., Wang N., Korotchenko T., Baranovskaya N., Farkhutdinov A. Impact of environmental radiation on the incidence of cancer and birth defects in regions with high natural radioactivity. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2022, vol. 19, no. (14):8643. Available at: <https://doi.org/10.3390/ijerph19148643> (accessed 15 June 2023).
- Bensoussan H., Grancolas L., Dhieux-Lestaevél B., Delissen O., Vacher C.M., Dublineau L., Voisin P., Gourmelon P., Taouis M., Lestaevél P. Heavy metal uranium affects the brain cholinergic system in rat following sub-chronic and chronic exposure. *Toxicology*, 2009, vol. 261, no. 1–2, pp. 59–67. DOI: 10.1016/j.tox.2009.04.054.
- Minyailo L. Elemental composition of hair of residents of cities of North-Western Siberia with various purification of drinking water. *Human ecology*, 2019, no. 11, pp. 4–11. In Rus. DOI: 10.33396/1728-0869-2019-11-4-11.
- Korchina T.Ya. Correlation communications between concentration of chemical elements in hair of natives of the Tyumen North and their content in natural waters of the region. *Bulletin of restorative medicine*, 2008, vol. 5a, no. 28, pp. 38–42.

27. Kehagia K., Bratakos S., Kolovou M., Potiradis C. Hair analysis as an indicator of exposure to uranium. *Radiation Protection Dosimetry*, 2010, vol. 144, no. 1–4, pp. 423–426. DOI: 10.1093/rpd/ncq324
28. Kist A.A., Radyuk R.I., Zhuk L.I., Pikul V.P., Belyaev A.D. Human hair radioactivity in the Chernobyl area. *J. Alloys Compd.*, 1994, vol. 213/214, pp. 81–85.
29. Mohagheghi A.H., Shanks S.T., Zigmond J.A., Simmons G.L., Ward S.L.A. A survey of uranium and thorium background levels in water, urine, and hair and determination of uranium enrichments by ICP-MS. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2005, vol. 263, no. 1, pp. 189–195.
30. Farkhutdinov I.M., Khayrullin R.R., Soktoev B.R., Zlobina A.N., Chesalova E.I., Farkhutdinov A.M., Tkachev A.V. Uranium in man-made carbonates on the territory of Ufa. *Journal of Mining Institute*, 2023. pp. 1–12. Available at: <https://doi.org/10.31897/PMI.2023.4> (accessed 15 June 2023).
31. Mongolina T., Baranovskaya N., Soktoev B. Elemental composition of salt deposits of drinking waters of the Tomsk region. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2011, vol. 319, no. 1, pp. 204–211.
32. Yazikov E.G., Rikhvanov L.P., Baranovskaya N.V. The indicator role of salt deposits in water during geochemical monitoring. *Izvestiya vuzov*, 2004, no. 1, pp. 67–69. In Rus.
33. Rikhvanov L.P., Baranovskaya N.V., Soktoev B.R., Mongolina T.A. Evaluation of drinking water according to geochemical composition of its salt deposition. *Proceedings of 8th International Conference «Environmental Engineering»*. Vilnius, Lithuania, May 19–20, 2011. pp. 337–342
34. Fassel V., Guinn V., Haas W., Hambidge K., Hamilton E., Hoste J. *Element analysis of biological materials. Current problems and techniques with special reference to trace elements. Ap. II. Technical reports series*. Vienna, IAEA, 1980. no. 197, pp. 351–367.
35. Sudyko A.F. Opređenje urana, toriya, skandiya i nekotorykh redkozemelnykh elementov v dvadtsati chetyrekh standartnykh obraztsakh sravneniya instrumentalnym neytronno-aktivatsionnym metodom [Determination of uranium, thorium, scandium and some rare earth elements in twenty-four standard comparison samples by instrumental neutron activation method]. *Radioaktivnost i radioaktivnye elementy v srede obitaniya cheloveka. Materialy V Mezhdunarodnoy konferentsii* [Radioactivity and radioactive elements in the human environment. Proc. of the V International Conference]. Tomsk, STT Publ., 2016. pp. 620–624.
36. Soktoev B.R., Rikhvanov L.P., Arynova Sh.Zh. Estestvennye radioaktivnye elementy (Th, U) v solevykh otlozheniyakh prirodnykh presnykh vod [Natural radioactive elements (Th, U) in salt deposits of natural fresh water]. *Radioaktivnost i radioaktivnye elementy v srede obitaniya cheloveka. Materialy V Mezhdunarodnoy konferentsii* [Radioactivity and radioactive elements in the human environment. Proc. of the V International Conference]. Tomsk, STT Publ., 2016. pp. 599–603.
37. Narkovich D.V. *Elementny sostav volos detey kak indikator prirodno-tekhnogennoy obstanovki territorii (na primere Tomskoy oblasti)*. Avtoreferat Dis. Kand. nauk [The elemental composition of children's hair as an indicator of the natural and man-made situation of the territory (on the example of the Tomsk region). Cand. Diss. Abstract]. Tomsk, 2012. 24 p.
38. Rodushkin I., Axelsson M.D. Application of double focusing sector field ICP-MS for multielement characterisation of human hair and nails. P. II A study of the inhabitants of northern Sweden. *Sci. Tot. Environment*, 2000, no. 262, pp. 21–36. DOI: 10.1016/S0048-9697(00)00531-3.
39. Akamine A.U., Duchon Silva M.A., Saiki M., Vasconcellos M.B.A., De Andrade S.L., Fulfaro R. Determination of Uranium in human head hair of a Brazilian population group by epithermal neutron activation analysis. *J. Radioanal Nucl. Chem.*, 2007, vol. 271, pp. 607–609. DOI: 10.1007/s10967-007-0315-x.
40. Byrne A.R., Benedick L. Uranium content of blood, urine and hair of exposed and non exposed persons determined by radiochemical neutron activation analysis with emphasis on quality control. *Sci Total Environ.*, 1991, no. 107, pp. 143–157.
41. Imahori A., Fukushima I., Shiobara S., Yanagida Y., Tomura K. Multielement neutron activation analysis or human scalp hair. A local population survey in the Tokyo metropolitan area. *J. Radioanal Chem.*, 1997, vol. 52 (1), pp. 167–180. DOI: 10.1007/BF02517711.
42. Gonnens R., Kol R., Laichter Y., Halicz L., Lorber A., Karpas Z. Determination of Uranium in human hair by acid digestion and FIAS-ICPMS. *J. Radioanalytical Nucl. Chem.*, 2000, vol. 243, no. 2, pp. 559–562. DOI: 10.1023/A:1016031726512.
43. Alaani S., Tafash M., Busby C., Hamdan M., Blaurock-Busch E. Uranium and other contaminants in hair from the parents of children with congenital anomalies in Fallujah, Iraq. *Confl Health.*, 2011, v. 5, no. 15. Available at: <https://doi.org/10.1186/1752-1505-5-15> (accessed 15 June 2023).
44. Muikku M., Puhakainen M., Heikinen T., Ilus T. The mean concentration of Uranium in drinking water, urine and hair of the occupationally unexposed Finnish working population. *Health Phys.*, 2009, vol. 96, no. 6, pp. 646–654. DOI: 10.1097/01.HP.0000345026.98668.c4.
45. Winde F., Geipel G., Espina C., Schu'z J. Human exposure to uranium in South African gold mining areas using barber-based hair sampling. *PLoS ONE*, 2019, vol. 14, no. 6, e0219059. Available at: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0219059> (accessed 15 June 2023).
46. Stanco V.V., Chernenko M.B. *Populyarnaya biblioteka khimicheskikh elementov* [Popular library of chemical elements]. Moscow, Nauka Publ., 1983. Vol. 1, 574 p.
47. Volkov A.V., Novikov I.A., Razumovsky A.A., Murashov K.Yu., Sidorova N.V. Geochemical features and conditions of formation of copper sandstones of the Orenburg Urals. *Lithosphere*, 2018, vol. 18, no. 4, pp. 593–606. In Rus.
48. Kontar E.S. *Geologo-promyshlennyye tipy mestorozhdeniy medi, tsinka, svintsa na Urale (geologicheskie usloviya razmeshcheniya, istoriya formirovaniya, perspektivy)* [Geological and industrial types of copper, zinc, and lead deposits in the Urals (geological conditions of location, history of formation, prospects)]. Ekaterinburg, UGGU Publ., 2013. 199 p.
49. Dahlkamp F.J. *Geology of uranium deposits*. Berlin, Springer, 1993. 460 p.
50. Kamaletdinov M.A. To the 65th anniversary of the discovery of Devonian oil of the Volga-Urals. *Georesources*, 2009, no. 1, pp. 46–48. In Rus.
51. Sobolev I.S. Methods of radiogeochemistry in the ground search for oil and gas deposits. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2007, vol. 311, no. 1, pp. 90–96. In Rus.
52. Reddy A.S., Rao N.V. Radiation anomaly correlation helpful in KrishnaGodavari basin. *Oil and Gas Journal*, 2002, April 15, pp. 38–42.
53. Al-Masri M.S., Aba A. Distribution of scale containing NORM in different oilfields equipment. *Appl. Radiat. Isotopes*, 2005, vol. 63, pp. 457–463.
54. Khalid Al Nabhani, Faisal Khan, Ming Yang. Technologically enhanced naturally occurring radioactive materials in oil and gas production: a silent killer. *Process Safety and Environmental Protection*, 2016, vol. 99, pp. 237–247. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2015.09.014> (accessed 15 June 2023).
55. Kamaletdinov M.A. Pokrovyne struktury Urala [Overlapped structure of the Urals]. Moscow, Nauka Publ., 1974. 230 p.
56. *Geologicheskaya karta Bashkortostana (masshtab 1:600000)* [Geological map of Bashkortostan (scale 1:600000)]. Ed. by M.A. Kamaletdinov. Moscow, Glavnoe upravlenie geodezii i kartografii pri Sovete Ministrov SSSR Publ., 1980. 50 p.
57. Grigoriev N.A. *Raspredelenie khimicheskikh elementov v verkhney chasti kontinentalnoy kory* [Distribution of chemical elements in the upper part of the continental crust]. Yekaterinburg, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences Publ., 2009. 383 p.
58. Nakaona L., Maseka K.K., Hamilton E.M., Watts M.J. Using human hair and nails as biomarkers to assess exposure of potentially harmful elements to populations living near mine waste dumps. *Environ Geochem Health*, 2020, no. 42, pp. 1197–1209. Available at: <https://doi.org/10.1007/s10653-019-00376-6> (accessed 15 June 2023).
59. Ali M.U., Wang Ch., Li Y., Li R., Yang Sh., Ding L., Feng L., Wang B., Li P., Wong M.H. Heavy metals in fish, rice, and human hair and health risk assessment in Wuhan city, central China. *Environmental Pollution*, 2023, vol. 328, no. 12160. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.121604> (accessed 15 June 2023).

60. Dorokhova L.A., Yusupov D.V., Toropov A.S., Raputa V.F., Pavlova L.M., Radomskaya V.I., Sudyko A.F., Baranovskaya N.V. Analysis of uranium distribution in aerosol precipitation on the territory of Novosibirsk. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic*

University. Geo Assets Engineering, 2023, vol. 334, no. 1, pp. 7–18. In Rus.

Received: 24 June 2023.

Reviewed: 17 July 2023.

Information about the authors

Anastasia N. Zlobina, Cand. Sc., senior teacher, Ufa University of Science and Technology

Leila M. Farkhutdinova, Dr. Sc., professor, Bashkir State Medical University.

Iskhak M. Farkhutdinov, Cand. Sc., chief manager, OOO RN-BashNIPIneft; academic secretary, Vernadsky State Geological Museum of the Russian Academy of Sciences.

Alexandra I. Belyanovskaya, Cand. Sc., senior researcher, Tyumen State University.

Natalia V. Baranovskaya, Dr. Sc., professor, Tomsk Polytechnic University.

Elena I. Chesalova, researcher, Vernadsky State Geological Museum of the Russian Academy of Sciences.

Anvar M. Farkhutdinov, Cand. Sc., researcher, CY Cergy Paris University.

Larisa A. Khayrulina, senior teacher, Ufa University of Science and Technology.

Elizaveta V. Krestyannikova, laboratory researcher, Tyumen State University; junior researcher, Tyumen State Medical University; senior teacher, Tyumen Industrial University.

УДК 622.24

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ОТРАБОТАННОГО ТУРБИННОГО МАСЛА В БУРОВОМ РАСТВОРЕ В КАЧЕСТВЕ СМАЗЫВАЮЩЕЙ ДОБАВКИ

Ламбин Анатолий Иванович¹,
alambin@ex.istu.edu

Аверкина Елена Владимировна¹,
averkina.l@yandex.ru

Ерыгина Анастасия Николаевна²,
erygina_an@irkutskoil.ru

Аверкин Никита Алексеевич¹,
awerk1n2000@mail.ru

¹ Иркутский национальный исследовательский технический университет,
Россия, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

² ООО «ИНК-СЕРВИС»,
Россия, 664007, г. Иркутск, ул. Октябрьской Революции, 24А.

Актуальность. Ежегодно увеличиваются объемы потребления смазочных материалов и, как следствие, объемы отработанных масел. В результате накапливаются их большие объемы, для которых требуются типовые приемы обращения с ними. Известно, что масла, в том числе отработанные, используются в качестве смазывающих добавок к буровому раствору. Практика последних лет показала целесообразность замены смазывающих добавок на отработанные смазочные масла, которые обеспечивали бы сохранение основных и достижения новых свойств. Также в данной статье приведены результаты исследования мицеллообразующих растворов при влиянии солей Na и K на их фильтрационные и коркообразующие свойства.

Цель: оценка возможности использования отработанного турбинного масла в буровом растворе в качестве компонента смазывающей добавки, а также его влияние на основные параметры бурового раствора; изучение влияния взаимодействия масла, эфира и соли на фильтрационные и коркообразующие свойства бурового раствора.

Объект: отработанные турбинные масла двигателей, отобранные на буровой площадке во время строительства скважины.

Методы. Для образования мицелл использовали воду, техническое масло и эфир. Исследования проводились с привлечением методики полного факторного эксперимента, в которой изучаемые влияния соли в растворах аппроксимировались в виде полиномов первого порядка.

Результаты. Замерены показатели бурового раствора. Путем сравнения первых коэффициентов полиномиальных моделей выявлено существенное влияние хлорида натрия на реологические и фильтрационные свойства растворов и липкость их фильтрационных пленок. Статистически подтверждено влияние хлоридов на группу из восьми растворов в разных масляных фракциях, для чего использовались критерии Стьюдента и Манна–Уитни. Приведена графическая интерпретация некоторых аппроксимаций уравнений влияния взаимодействия ингредиентов раствора на откликовую величину.

Ключевые слова:

смазочные добавки, буровой раствор, реологические и триботехнические свойства бурового раствора, коэффициент липкости фильтрационной корки.

Введение

В настоящее время строительство скважин осуществляется в различных условиях, характеризующихся многообразием геологического строения месторождений. Растет количество и глубина наклонно-направленных скважин и скважин с горизонтальным окончанием, повышается температура, усложняется их конструкция и комплекс внутрискважинного обслуживания, расположенного в нижней части буровой колонны. В результате возрастают силы сопротивления, возникающие как при вращении инструмента, находящегося в скважине, так и при спуско-подъемных операциях. Таким образом, для успешного и безаварийного бурения скважин материалы, применяемые в составе буровых растворов, должны обладать определенными триботехническими (смазочными, противоизносными, антиприхватными) свойствами, а также к ним должны предъявляться повышенные экологические требования [1].

Триботехнические свойства определяют способность буровых растворов снижать силу трения между контактирующими поверхностями. При этом снижение силы трения позволяет [2]:

- уменьшить крутящий момент при вращении колонны буровых труб и снизить сопротивление при ее продольном перемещении в наклонных и горизонтальных участках скважины, что в целом снижает энергоемкость процесса бурения;
- снизить вероятность возникновения дифференциальных прихватов и затраты на их ликвидацию;
- повысить ресурсы работы буровых труб и их соединений, гидравлических частей буровых насосов, забойных двигателей и породоразрушающего инструмента.

Упомянутые свойства буровых растворов улучшаются, как правило, введением смазочных добавок, широкий ассортимент которых используется в отечественной и зарубежной буровой практике. Смазочные

добавки снижают фазовую проницаемость фильтрата через корку, следовательно, уменьшают коэффициент сопротивления страгивания бурильной колонны по корке и фрикционное взаимодействие трущихся пар [3].

Для нефтяной и газовой промышленности представлен большой ассортимент высокоэффективных смазочных добавок на основе природных растительных и животных жиров, а также продукты химического и нефтехимического синтеза (сложные эфиры, многоатомные спирты, масла). Современные смазочные добавки представляют собой сложные многокомпонентные композиции, обладающие полифункциональным действием на промывочную жидкость и границы пар трения.

Отработанные нефтепродукты токсичны, имеют высокую степень биоразлагаемости и являются опасными отходами, которые подлежат обязательному сбору и утилизации, а в отдельных случаях – уничтожению. Сказанное относится абсолютно ко всем группам смазочных масел, в том числе и к турбинным. Смазочные масла находят широкое применение при эксплуатации современной техники. Ежегодно увеличиваются объемы потребления смазочных материалов и, как следствие, объемы отработанных масел [2, 4]. В результате накапливаются большие объемы отработанных масел, для которых требуются типовые приемы обращения с ними.

Известно, что масла, в том числе отработанные, используются в качестве смазывающих добавок к буровому раствору. Практика последних лет показала целесообразность замены смазывающих добавок на отработанные смазочные масла [5].

Наличие данной информации позволило предположить возможность использования отработанного турбинного масла в качестве компонента смазывающей добавки.

Совершенствование технологических жидкостей для бурения и ремонта скважин осуществляется с учетом рассмотрения их как дисперсных систем, с понятием которых связана обширная теоретическая база [2, 3]. Использование этой базы определяет развитие приготовления буровых растворов с заданными свойствами [4, 5]. Состояние ствола скважины и общая обстановка в ней и определяют заданные свойства приготавливаемой промывочной жидкости. Частота изменения свойств жидкости зависит от количества зон с несовместимыми условиями бурения. Предотвращение технологических осложнений или снижение степени их проявления в процессе строительства скважины во многом определяется составом и свойствами бурового раствора [6]. Значительную роль в технологии углубки скважины играют реологические параметры промывочной жидкости и смазочные свойства. Варьированием параметров решаются вопросы транспорта шлама, гидродинамических сопротивлений, механического трения и др. [7].

Наряду с гидродинамическими задачами, решаемыми с помощью изменения состава бурового раствора, решаются задачи повышения устойчивости стенок скважины за счет образования на них плотной, тонкой корки [8], то есть раствор должен обладать минимальным значением показателя фильтрации.

Существует и ряд других аспектов технологии бурения, которые требуют вмешательства в состав базового бурового раствора, для изменения его адсорбционных и адгезионных свойств. К примеру, борьба с сальникообразованием и снижение механического трения определяют внесение в состав раствора смазывающих добавок [9].

Некоторые добавки изменяют сразу несколько свойств раствора, улучшая одни и ухудшая другие свойства. Современная направленность совершенствования буровых растворов заключается в обеспечении таких свойств, как высокие ингибирующие и триботехнические свойства, высокая плотность при низком содержании твердой фазы, устойчивость к различного рода загрязнениям, термостабильность и низкая коррозионная активность, высокая экологичность при приготовлении и даже при повторном применении [10].

Тенденция к применению микро- и наночастиц в буровых растворах позволяет совершенствовать управляемость их свойствами для достижения оптимальных условий [11, 12]. Одним из методов организации ультрамикрорегетерогенных систем в промывочных жидкостях является применение мицеллообразующих поверхностно-активных веществ (ПАВ) [13]. В их водных или углеводородных растворах за счет процессов самоорганизации дифильных молекул ПАВ образуются супрамолекулярные структуры в виде мицелл их агрегатов и пр. [14, 15].

Основная направленность вышеотмеченного определила постановку экспериментальных работ по выявлению влияния некоторых добавок на основные параметры микроэмульсионного бурового раствора.

Методика исследования

На кафедре нефтегазового дела Иркутского национального исследовательского университета проводились исследования по оценке возможности использования в буровом растворе в качестве компонента смазывающей добавки отработанного турбинного масла, а также его влияния на основные параметры бурового раствора.

Для исследования эффективности использования отработанных масел в качестве компонента бурового раствора приготавливались два типа минерализованных систем. Минерализация раствора проводилась путем ввода солей галита NaCl до насыщения и хлористого кальция KCl. Обе системы используются на месторождениях Восточной Сибири при бурении под техническую и эксплуатационные колонны. Общая схема приготовления растворов представлена на рис. 1.

В каждой системе биополимер выполняет функцию структурообразователя, полианионная целлюлоза и крахмал предназначены для регулирования реологических свойств и контроля фильтрации, соответственно. Образование плотной фильтрационной корочки в интервалах поглощений бурового раствора достигается добавлением мраморной крошки различной фракции.

Для предотвращения затяжек и посадок инструмента при спускоподъемных операциях растворы об-

рабатываются смазочными добавками в концентрации 1,5–2 %.

В данной работе смазочные добавки заменены на отработанные турбинные масла двигателей, отобранные на буровой площадке во время строительства скважины. Были использованы 8 типов масел, собранных из редуктора-генератора, маслобака двигателя,

наработанное масло, а также их смесь. В таблице они обозначены как СМ-1, СМ-2... СМ-8. Концентрация вводимых масел была 1 и 2 %. Кроме этого, приготавливалась смесь масла и эфира для образования микроэмульсии. Оценивалось влияние продукта их взаимодействия на параметры бурового раствора. Результаты проведенных исследований представлены в таблице.

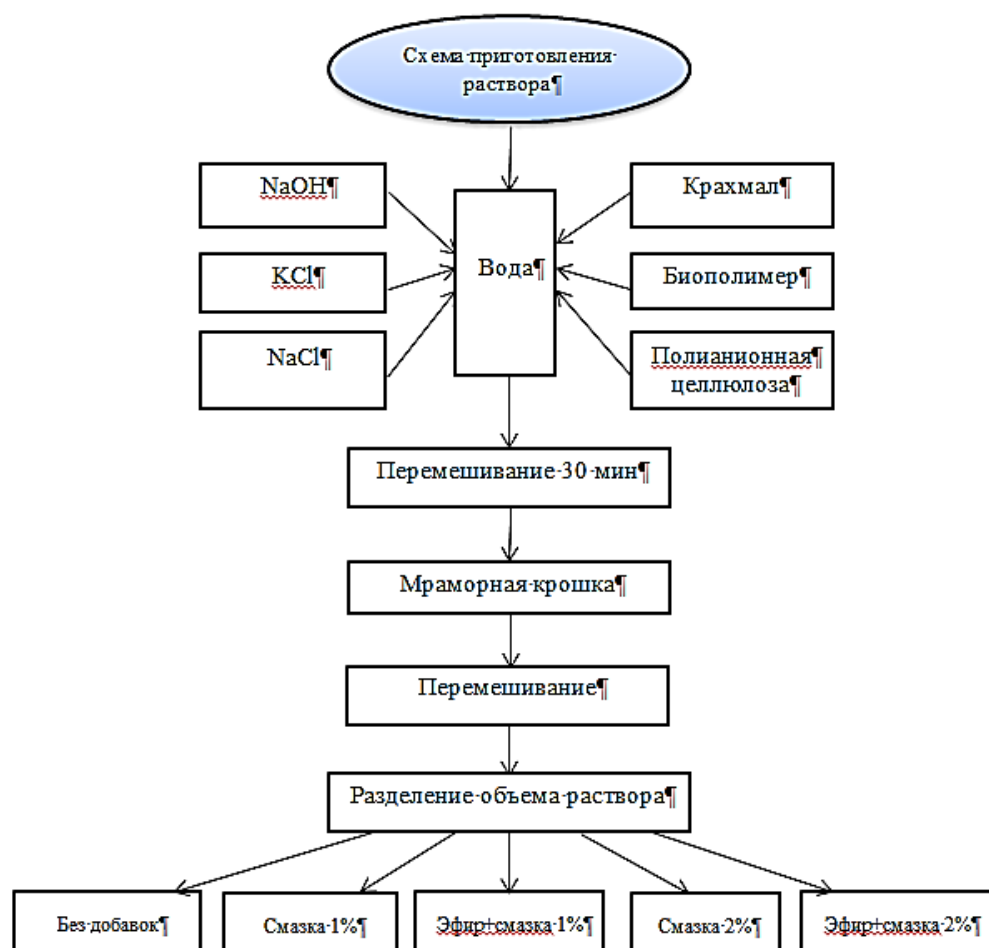


Рис. 1. Общая схема приготовления растворов: NaOH – гидроксид натрия; KCl – хлорид калия; NaCl – хлорид натрия

Fig. 1. General scheme of preparing of solutions: NaOH – sodium hydroxide; KCl – potassium chloride; NaCl – sodium chloride

Прежде чем вводить в буровой раствор различные концентрации масел и эфира проводился замер его параметров. У биополимерного соленасыщенного бурового раствора показатель фильтрации равен 4 см^3 , коэффициент липкости 0,1584; у биополимерного хлоркалиевого бурового раствора показатель фильтрации равен $6,1 \text{ см}^3$, коэффициент липкости 0,1763.

С целью сокращения числа опытов третий фактор – содержание соли в растворе, рассматривается как два фактора: на уровне –1 раствор содержит хлорид натрия (NaCl), а на уровне +1 – хлорид калия (KCl). Задача заключается в определении статистической значимости различия в действии солей на откликовую величину, которой является в данном случае показатель фильтрации.

Конечно, с целью уменьшения числа опытов можно было применить дробный факторный экспе-

римент [16], но тогда, в отличие от полного факторного эксперимента, происходит смешение факторов, что приводит к необходимости определения системы смешения через определяющий контраст [17], а это усложняет анализ экспериментальных данных.

Итак, рассматривалось влияние восьми видов смазочного материала, который представлен в виде смеси масел, отработки, взятой из картера двигателей после нескольких периодов работы и в виде чистых масел. Добавки этого материала производились в приготовленные по вышеуказанной схеме растворы (рис. 1, таблица).

Анализ экспериментальных данных с привлечением методики полного факторного эксперимента в данном случае требует определения статистической значимости различия средних значений или, в нашем случае, первых коэффициентов полученных моделей [18, 19].

Таблица. Влияние масел и смеси масел с эфиром на свойства минерализованных буровых растворов

Table. Effect of oils and mixture of oils with ether on the properties of mineralized drilling fluids

Тип смазки Lubricant type	Количество смазки, % Amount of lubricant, %	Наличие эфира Ether presence	Хлориды Chlorides	Показатель фильтрации Filtration rate	Кэф. липкости фильтрационной корки Coefficient of stickiness of the filtration crust	Угол закручивания пружины ротационного вискозиметра, RPM Twist angle of the rotary viscometer spring, RPM	
						600	300
CM-1 SM-1	1	1	KCl	9,6	0,0875	54,5	39,0
			NaCl	4,8	0,1272	68,5	50,0
		0	KCl	8,0	0,1850	54,3	38,9
			NaCl	6,2	0,1808	70,4	51,8
	2	1	KCl	5,8	0,0963	56,8	40,6
			NaCl	6,0	0,1228	69,4	51,0
		0	KCl	12,0	0,1629	54,6	38,6
			NaCl	5,2	0,1228	70,6	50,9
CM-2 SM-2	1	1	KCl	10,0	0,1095	55,2	39,9
			NaCl	5,6	0,1361	70,6	51,8
		0	KCl	4,4	0,1139	55,3	39,3
			NaCl	5,6	0,1184	70,2	50,6
	2	1	KCl	9,8	0,1228	56,5	39,9
			NaCl	6,0	0,0875	71,5	51,8
		0	KCl	11,0	0,1272	55,7	39,2
			NaCl	5,2	0,1673	71,4	52,1
CM-3 SM-3	1	1	KCl	4,6	0,1317	55,1	39,1
			NaCl	6,2	0,0963	70,8	51,3
		0	KCl	4,0	0,0568	53,7	37,0
			NaCl	5,4	0,2586	69,4	50,6
	2	1	KCl	4,6	0,1228	56,4	41,0
			NaCl	3,6	0,0963	72,1	51,5
		0	KCl	4,0	0,1272	53,5	37,7
			NaCl	2,8	0,1095	70,2	49,6
CM-4 SM-4	1	1	KCl	4,6	0,1584	54,7	39,2
			NaCl	5,2	0,0787	69,9	50,0
		0	KCl	3,6	0,1584	53,4	37,4
			NaCl	3,0	0,0875	69,5	50,4
	2	1	KCl	7,0	0,1405	57,0	41,1
			NaCl	5,6	0,1184	74,3	53,5
		0	KCl	4,8	0,0787	54,2	37,8
			NaCl	5,0	0,1944	70,8	51,1
CM-5 SM-5	1	1	KCl	4,2	0,0875	55,0	39,0
			NaCl	5,6	0,1184	69,3	48,5
		0	KCl	6,1	0,1495	54,0	37,8
			NaCl	4,2	0,2632	70,1	49,2
	2	1	KCl	10,5	0,1405	58,0	41,5
			NaCl	3,6	0,0919	72,2	50,8
		0	KCl	11,5	0,1763	54,8	38,5
			NaCl	2,4	0,1184	71,1	50,7
CM-6 SM-6	1	1	KCl	10,0	0,1450	54,5	38,4
			NaCl	5,2	0,1139	71,8	50,9
		0	KCl	4,2	0,0875	55,4	37,9
			NaCl	2,4	0,0831	70,0	49,8
	2	1	KCl	12,0	0,1272	56,8	40,7
			NaCl	2,2	0,1051	74,5	52,6
		0	KCl	3,8	0,0699	56,2	38,4
			NaCl	2,8	0,1095	73,7	49,7
CM-7 SM-7	1	1	KCl	3,6	0,0096	58,0	38,5
			NaCl	7,6	0,1139	68,8	48,7
		0	KCl	3,6	0,1317	56,1	37,7
			NaCl	4,2	0,2493	70,1	49,4
	2	1	KCl	3,0	0,1095	60,0	41,6
			NaCl	7,4	0,1361	71,5	54,1
		0	KCl	4,0	0,0524	53,7	37,6
			NaCl	3,4	0,1139	71,6	51,3
CM-8 SM-8	1	1	KCl	7,6	0,0568	54,8	40,2
			NaCl	6,4	0,1184	69,2	49,4
		0	KCl	8,0	0,1584	55,9	39,0
			NaCl	6,6	0,1405	70,5	49,5
	2	1	KCl	5,2	0,0919	63,2	49,6
			NaCl	3,4	0,1184	71,2	49,9
		0	KCl	7,2	0,0745	57,8	41,1
			NaCl	3,4	0,1007	72,8	52,2

В результате проведенного эксперимента получено восемь уравнений показателя фильтрации, коэффициенты которых определяют влияние каждого ингредиента раствора. По этим коэффициентам можно судить о направленности воздействия каждого ингредиента на показатель фильтрации раствора по уравнению (1).

$$y_{\phi}^1 = 7,2 + 0,05x_1 - 0,65x_2 + 1,65x_3 - 0,7x_1x_2 - 0,5x_2x_3 - 1,25x_1x_2x_3. \quad (1)$$

Кодовые обозначения факторов x_1, x_2, x_3 определяют, соответственно, смазка, эфир и соль. Подставив в уравнение (1) значения третьего фактора +1, т. е. влияние хлорида калия, получаем измененное уравнение (2), учитывающее влияние KCl:

$$y_{\phi} = 8,85 + 0,05x_1 - 1,15x_2 - 1,95x_1x_2. \quad (2)$$

Если подставить в (1) вместо $x_3 - 1$ для определения влияния NaCl на показатель фильтрации, то получим следующее уравнение (3):

$$y_{\phi} = 5,5 + 0,05x_1 - 0,15x_2 + 0,55x_1x_2. \quad (3)$$

Как видно, существенно изменились коэффициенты уравнения. Как известно, первый коэффициент отражает среднее значение рассматриваемого показателя при средних значениях ингредиентов. Уменьшение коэффициента 8,85 до 5,5 означает существенное влияние NaCl на показатель фильтрации в сторону уменьшения последнего.

На рис. 2 представлено влияние эфира и масляной фракции на показатель фильтрации раствора, содержащего NaCl и KCl.

Для большей наглядности это изменение показано на рис. 3.

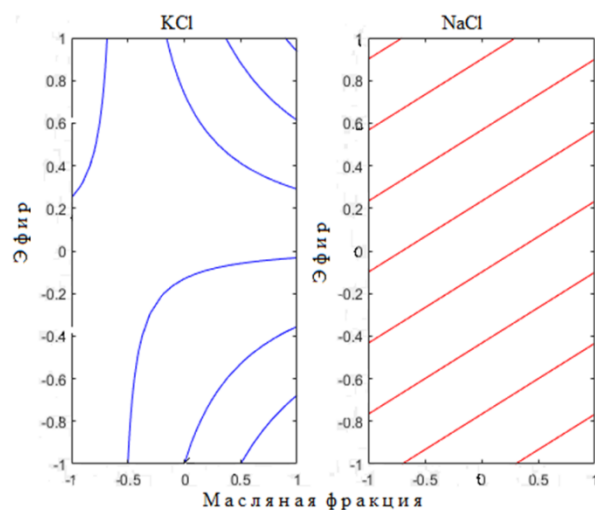


Рис. 2. Значения показателя фильтрации для растворов NaCl и KCl с маслом SM-1

Fig. 2. Filtration index values for NaCl and KCl solutions with oil SM-1

Сравнивая графики на рис. 2 и рассматривая расположение линий уровня, можно предположить, что значения изменяемых переменных (факторов) отображают область минимумов показателя фильтрации (стационарная область функции, отображающей показатель фильтрации).

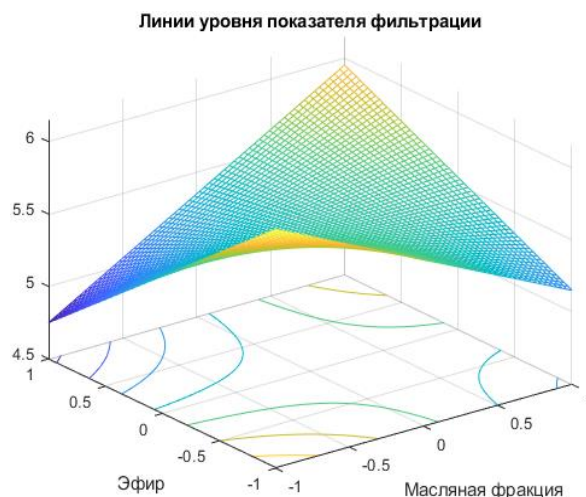


Рис. 3. Поверхность и линии уровня показателя фильтрации при интерпретации уравнения (3)

Fig. 3. Surface and lines of the filtration index level in the interpretation of equation (3)

Для растворов с маслом CM-2 получены уравнения (4)–(6):

$$y_{\phi}^2 = 7,2 + 0,05x_1 - 0,65x_2 + 1,65x_3 - 0,7x_1x_2 - 0,5x_2x_3 - 1,25x_1x_2x_3, \quad (4)$$

для KCl

$$y_{\phi}^2 = 8,8 + 1,6x_1 - 1,1x_2 - 1,70x_1x_2, \quad (5)$$

для NaCl

$$y_{\phi}^2 = 5,6 + 0,2x_2 + 0,25x_1x_2. \quad (6)$$

Графическая интерпретация уравнений (5) и (6) путем построения контурных графиков представлена на рис. 4.

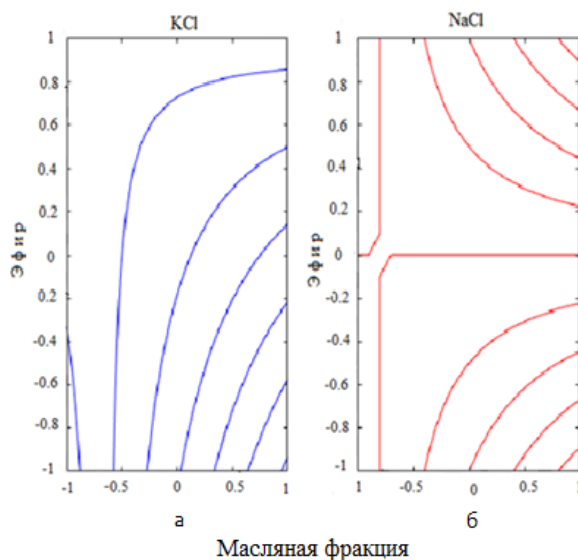


Рис. 4. Линии уровня показателя фильтрации при графическом представлении уравнений (5) и (6): а) в буровом растворе KCl; б) в буровом растворе NaCl

Fig. 4. Lines of the filtration index level in the graphical representation of equations (5) and (6): а) in KCl drilling fluid; б) in NaCl drilling fluid

В уравнениях (5) и (6) прослеживается (по первым коэффициентам) снижение показателя фильтрации при наличии в растворе NaCl. Такая тенденция просматривается и для остальных растворов, что определяет постановку задачи о статистической значимости снижения показателя фильтрации во всех исследуемых растворах с NaCl.

Для этой цели определяем ряд значений, составленный из первых коэффициентов моделей, полученных для каждого раствора по вышеизложенной методике.

Подставив во все уравнения вместо $x_3 + 1$, получаем ряд средних значений, т. е. первых коэффициентов, которые мы представим в виде выборки:

$$S_{KCl} = 8,85 \ 8,8 \ 4,3 \ 5,0 \ 8,075 \ 7,5 \ 3,55 \ 7,0.$$

Проведя подстановку в уравнения значения третьего фактора в виде -1 , т. е. введение NaCl в систему из восьми растворов, получаем новую выборку значений показателя фильтрации

$$S_{NaCl} = 5,55 \ 5,6 \ 4,5 \ 4,7 \ 3,95 \ 3,15 \ 4,8 \ 4,95.$$

Существенность различия от воздействия солей на показатель фильтрации определим с помощью статистического критерия Стьюдента. Так как выборки одинаковые по величине, t – критерий Стьюдента [20–22] определится по формуле (7):

$$t = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{\sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}}} \quad (7)$$

где $\bar{X}_1, \bar{X}_2$ – значения среднего выборки; S_1, S_2 – среднеквадратическое отклонение выборок; n_1, n_2 – объем выборок с учетом определения среднего значения выборки

$$t = \frac{6,634375 - 4,65}{\sqrt{\frac{6,313}{7} + \frac{0,6557}{7}}} = 2,52.$$

Сравнивая расчетное значение критерия с критическим, равным для нашего случая 2,145, отвергаем нулевую гипотезу, которая предполагает равенство средних, т. е. отсутствие различия. Отсюда следует вывод о различии воздействия солей на показатель фильтрации. То есть NaCl существенно уменьшает показатель фильтрации по сравнению с введением в состав раствора KCl. Механизм этого воздействия требует отдельного рассмотрения.

Определение степени влияния солей на липкость фильтрационной пленки для системы из восьми растворов производилось по вышеприведенному алгоритму.

Липкость пленки, полученной в эксперименте с раствором, содержащим масляную фракцию СМ-1, представлена в виде уравнений (8)–(10):

$$y_{\text{КТК}}^1 = 0,1357 - 0,0095x_1 - 0,0272x_2 - 0,0027x_3 + 0,0106x_1x_2 + 0,0061x_1x_3 - 0,0138x_2x_3 - 0,0028x_1x_2x_3, \quad (8)$$

для KCl

$$y_{\text{КТК}}^1 = 0,1303 - 0,0034x_1 - 0,0410x_2 + 0,0078x_1x_2, \quad (9)$$

для NaCl

$$y_{\text{КТК}}^1 = 0,1384 - 0,0156x_1 - 0,0134x_2 + 0,0078x_1x_2, \quad (10)$$

и их графической интерпретацией на рис. 5, 6.

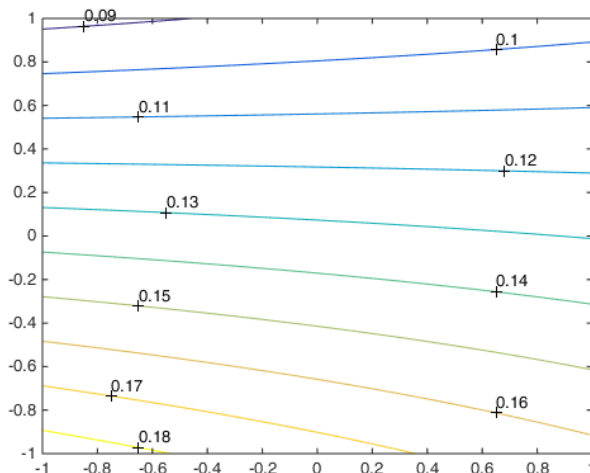


Рис. 5. Линии уровня липкости пленки при интерпретации уравнения (9)

Fig. 5. Film stickiness level lines in the interpretation of equation (9)

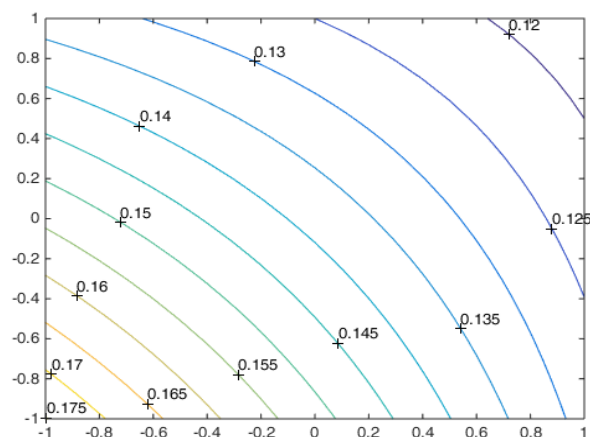


Рис. 6. Линии уровня липкости пленки при интерпретации уравнения (10)

Fig. 6. Film stickiness level lines in the interpretation of equation (10)

Выборка, составленная из показателей липкости пленки при воздействии KCl на систему растворов, имеет следующий вид:

$$S_{KCl} = 0,1303 \ 0,1183 \ 0,0943 \ 0,1340 \ 0,1384 \ 0,1074 \ 0,0759 \ 0,0954.$$

Воздействие NaCl на эту же систему представлено выборкой:

$$S_{NaCl} = 0,1386 \ 0,1273 \ 0,1402 \ 0,1198 \ 0,1480 \ 0,1006 \ 0,1533 \ 0,1196.$$

Сравнение средних значений выборок по t -критерию Стьюдента, равному 1,9289, показывает незначительность их различий, т. е. нулевая гипотеза не отвергается. Однако сравнение средних значений выборок по ранговому критерию Манна–Уитни определяет их существенное различие. По-видимому, значительная эксцентричность выборок (графики выборок, полученные с помощью среды STATISTICA-12, здесь не показаны) не позволяет использовать для сравнения параметрический критерий Стьюдента.

Таким образом, липкость пленок при фильтрации растворов, содержащих соль натрия, больше, чем растворов с солью калия. Этот факт также требует объяснения.

Влияние солей на реологические свойства растворов изучалось с помощью ротационной вискозиметрии (таблица). Используя общеизвестный факт, что полимерные растворы подчиняются степенной зависимости по формуле (11):

$$\tau = K\dot{\gamma}^n, \quad (11)$$

показания прибора (θ) на частотах вращения ротора 300 и 600 об/мин переводились в параметры этой зависимости по общепринятым формулам (12), (13):

$$n = 3,32 \log \left(\frac{\theta_{600}}{\theta_{300}} \right), \quad (12)$$

$$K = \frac{\theta_{600}}{1022n}, \quad (13)$$

где τ – напряжение сдвига, Па; $\dot{\gamma}$ – скорость сдвига, с^{-1} .

Параметр n – показатель нелинейности зависимости и K – коэффициент консистенции определяют реологию псевдопластичных жидкостей. Этот коэффициент численно равен напряжению сдвига при градиенте скорости, равном 1 с^{-1} [23, 24]. Чем большее значение K , тем большую вязкость имеет жидкость и, следовательно, обладает большей выносной способностью при ламинарном режиме течения, что важно для очистки скважины в процессе ее углубки.

Для раствора, имеющего масляную фракцию из смеси масел МС-1 и МС-2, составлен полный факторный эксперимент, в результате которого получено полиномиальное уравнение коэффициента консистенции, вычисленного по формулам (12), (13), исходя из показаний ротационного вискозиметра при частотах вращения ротора в 300 и 600 об/мин получаем уравнение (14):

$$y = 2,4593 - 0,0646x_1 + 0,0552x_2 + 0,5694x_3 + 0,1424x_1x_2 - 0,0228x_1x_3 - 0,0113x_2x_3 + 0,0687x_1x_2x_3. \quad (14)$$

Кодовые обозначения факторов $x_1x_2x_3$ определяют, соответственно, масло, эфир и соль. Третий фактор – соль, в данном случае подразделяли: на уровне -1 применялся хлорид К, на уровне $+1$ – хлорид Na. При подстановке этих кодовых обозначений в уравнение (13) получили уравнения (15)

$$y_{KCl}^1 = 1,8899 - 0,0418x_1 + 0,0665x_2 + 0,0737x_1x_2,$$

$$y_{NaCl}^1 = 3,0287 - 0,0874x_1 + 0,0439x_2 + 0,2111x_1x_2, \quad (15)$$

определяющие влияние масла, эфира и соответствующей соли с первой масляной фракцией на изменение коэффициента консистенции. По этим уравнениям для наглядности построены графики на рис. 7, 8.

На рис. 7 показана зависимость коэффициента консистенции от концентрации масла и эфира в растворе при растворении в нем KCl. Сравнение уравнений (15) и их графической интерпретации (рис. 7, 8) выявляет большее влияние хлорида натрия на вязкость суспензии, чем хлорида калия. Этому явлению пока нет теоретического обоснования.

Сравнение графиков показывает, что в растворе с KCl вязкость подвергается большей изменчивости за счет изменения концентрации эфира, а в растворах с NaCl – за счет изменения концентрации смазки.

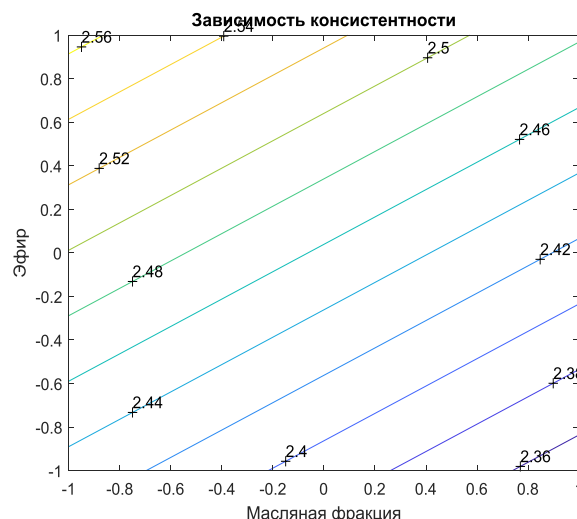


Рис. 7. Влияние состава раствора на его консистенцию
Fig. 7. Solution composition effect on its consistency

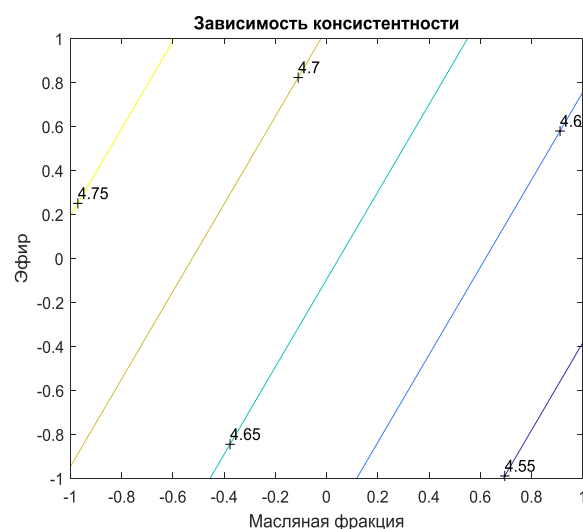


Рис. 8. Коэффициент консистенции при NaCl-обработке
Fig. 8. Consistency coefficient during NaCl treatment

Заключение

Таким образом, в данной работе проведены сравнительные исследования возможности использования отработанных масел в качестве смазывающей добавки в NaCl и KCl буровых растворах. Анализируя полученные данные, можно отметить, что введение масел и смеси масел с эфиром (микроэмульсий) в различных концентрациях незначительно влияет на фильтрационные свойства буровых систем. В некоторых случаях в растворе KCl значение показателя увеличилось до 12 см^3 с маслом МС-6, что не критично и может быть отрегулировано с помощью ввода полимеров. В растворе NaCl резких скачков показателя фильтрации не наблюдалось. По данным, полученным при определении коэффициента липкости, можно видеть, что этот параметр снижался в большинстве случаев при добавлении масел и микроэмульсий. Исключением являются растворы NaCl с маслами МС-3 и МС-7. В связи с этим можно предположить, что

вводимые отработанные масла и смесь масел с эфиром можно использовать в качестве смазывающей добавки к буровому раствору.

Кроме этого, на фоне биополимерного раствора изучалось влияние взаимодействия масла, эфира и соли на фильтрационные и коркообразующие свойства бурового раствора. Выявлено существенное влияние NaCl на указанные свойства. Хлорид натрия в растворах снижает их показатель фильтрации, также повышает вязкость и увеличивает липкость фильтрационной пленки. Использована методика полного факторного эксперимента, причем для сокращения

числа опытов NaCl и KCl объединили в один фактор, но на уровне «+» фигурировал хлорид калия, а на уровне «–» – хлорид натрия. При моделировании вязкости растворов значения знаков было изменено. Это позволило статистически обозначить существенную разницу во влиянии солей на параметры всей рассматриваемой группы растворов. Можно предположить, что отмеченная разница осуществляется за счет разных гидратных оболочек катионов Na и K.

Большим интересом остаются механизмы образования коллоидных фракций в рассмотренных системах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Королев А.С. Анализ влияния на коэффициент трения смазочной добавки для буровых растворов ЭСД-1 // Проблемы разработки месторождений углеводородных и рудных полезных ископаемых. – 2016. – № 1. – С. 55–58.
2. Булатов А.И., Бурыкин А.Н., Мойса Ю.Н. Практическое руководство по промывке и цементированию нефтяных и газовых скважин. – Краснодар: Изд-во «Просвещение-Юг», 2015. – 305 с.
3. Хузина Л.Б., Голубь С.И. О смазочных добавках для буровых растворов // Бурение и нефть. – 2019. – № 5. – С. 30–33.
4. Махоро В.А., Каменщиков Ф.А. Новые смазочные добавки для буровых растворов // Бурение и нефть. – 2003. – № 2. – С. 15–17.
5. Preparation and tribological properties of dual-coated TiO₂ nanoparticles as water-based lubricant additives / Y. Gu, X. Zhao, Y. Liu, Y. Lv // Journal of nanomaterials. – 2014. – V. 2014. – P. 1–8.
6. Investigation of anti-corrosion properties of environmentally safe additives to drilling solutions based on tar of cotton oil / V.P. Bondarenko, V.G. Golubev, M.K. Zhantassov, A.S. Sadyrbayeva, Z.H.K. Nadirova, N.B. Ainabekov // Chemistry Today. – 2017. – V. 35. – № 17. – P. 32–36.
7. Митюк Д.Ю., Винокуров В.А., Фролов В.И. Физико-химические основы процессов добычи нефти. – М.: Изд-во «Нефть и газ», 2008. – 190 с.
8. Бабаян Э.В., Мойса Н.Ю. Буровые растворы. – М.: Изд-во «Инфра-Инженерия», 2019. – 328 с.
9. Марусов М.А., Мойса Ю.Н. Современные тенденции применения ингибирующих смазывающих добавок для утяжеленных буровых растворов Кубани // Бурение и нефть. – 2021. – № 7–8. – С. 26–29.
10. Поминова О.В., Грисюк П.В., Ескин К.В. Современные разработки новых высокоингибированных систем буровых растворов // Бурение и нефть. – 2020. – № 6. – С. 32–34.
11. Rheological and filtration characteristics of drilling fluids enhanced by nanoparticles with selected additives: an experimental study / N. Mohamadian, H. Ghorbani, D. Wood, H.K. Hormozi // Advances in Geo-Energy Research. – 2018. – V. 2 (3). – P. 228–236.
12. Singh S., Ahmed R. Vital role of nanopolymers in drilling and stimulations fluid applications // SPE Annual Technical Conference and Exhibition. – Florence, Italy, September, 2010. – P. 1–7.
13. Разработка и оценка Не: микроэмульсионной смазки для буровых растворов / Б. Донг, Е. Чжан, Цю Чжэнсун и др. // Материалы Международной конференции по нефтяным и нефтехимическим технологиям. – Сингапур, 2018. – С. 29–37.
14. Water-in-oil microemulsion drilling fluids: Patent US4012329A. Fil. 09.22.1975; Publ. 03.15.1977.
15. Preparation and tribological properties of dual-coated tio₂ nanoparticles as water-based lubricant additives / Gu Yue, Zhao Xiuchen, Liu Ying, Lv Yunxia // Journal of nanomaterials. – 2014. – V. 2014. – P. 1–9.
16. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. – М.: Изд-во «Наука», 1976. – 279 с.
17. Transformation of institutions of socio-economic development in the conditions of a long-term viral pandemic / I. Litvinenko, L. Gaisina, L. Semenova, E. Averkina, E. Gabdrakhmanov // AD ALTA: Journal of Interdisciplinary Research. – 2021. – V. 11. – № 2. – S21. – P. 220–224.
18. Дрейпер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ. 3-е изд. пер. с англ. – М.: ИД «Вильямс», 2007. – 912 с.
19. Кобзарь А.И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников. – М.: Изд-во «ФИЗМАТЛИТ», 2012. – 816 с.
20. Пен Р.З., Чендылова Л.В., Шапиро И.Л. Реологические свойства меловальных суспензий // Химия растительного сырья. – 2004. – № 4. – С. 11–15.
21. Rao K.P., Wei J.J. Performance of a new dry lubricant in the forming of aluminum alloy sheets // Wear. – 2001. – V. 12. – № 249. – P. 85–92.
22. Dvoynikov M.V., Nutskova M.V., Blinov P.A. Developments made in the field of drilling fluids by saint petersburg mining university // International journal of engineering, Transactions A: Basics. – 2020. – V. 4. – № 33. – P. 702–711.
23. Проблемы обращения с синтетическими турбинными маслами на основе триксиленилфосфатов / Д.В. Митрофанова, А.А. Жжоникова, Ж.В. Сурикова, Д.О. Сидоренко // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. – 2019. – № 6 (291). – С. 65–67.
24. Разработка технологии получения компонентов буровых растворов на основе отработанных огнестойких турбинных масел / Д.О. Сидоренко, Д.В. Митрофанова, А.А. Жжоникова, Ж.В. Сурикова // Материалы Международной научно-практической конференции. – Магас: Ингушский государственный университет, 2021. – С. 245–249.

Поступила: 22.03.2023 г.

Прошла рецензирование: 17.04.2023 г.

Информация об авторах

Ламбин А.И., кандидат технических наук, доцент кафедры нефтегазового дела Иркутского национального исследовательского технического университета.

Аверкина Е.В., старший преподаватель кафедры нефтегазового дела Иркутского национального исследовательского технического университета.

Ерыгина А.Н., инженер по растворам службы буровых растворов ООО «ИНК-СЕРВИС».

Аверкин Н.А., магистрант кафедры нефтегазового дела Иркутского национального исследовательского технического университета.

UDC 622.24

EVALUATION OF THE POSSIBILITY OF USING SPENT TURBINE OIL AS A LUBRICATING ADDITIVE IN DRILLING MUD

Anatoly I. Lambin¹,
alambin@ex.istu.edu

Elena V. Averkina¹,
averkina.l@yandex.ru

Anastasia N. Erygina²,
erygina_an@irkutskoil.ru

Nikita A. Averkin¹,
awerk1n2000@mail.ru

¹ Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov street, Irkutsk, 664074, Russia.

² INK-Service,
24A, Oktyabrskoy revolyutsii street, Irkutsk, Russia.

The relevance. The consumption of lubricants and, as a result, the volume of used oils increases annually. As a result, large volumes of them are accumulated, which require standard methods of handling them. It is known that oils, including waste ones, are used as lubricating additives to a drilling mud. The practice of recent years has shown the expediency of replacing lubricating additives with used lubricating oils, which would ensure the preservation of the main and the achievement of new properties. This article presents the results of a study of micelle-forming solutions under the influence of Na and K salts on their filtration and crust-forming properties.

The main aim: evaluation of the possibility of using spent turbine oil in the drilling mud as a component of a lubricating additive, as well as its effect on the main parameters of the drilling mud; study of the effect of oil, ether and salt interaction on filtration and crust-forming properties of the drilling mud.

Objects: spent turbine engine oils selected at the drilling site during a well construction.

Methods. Drilling mud indicators were measured. Water, technical oil and ether were used to form micelles. The studies were carried out using the methodology of a complete factor experiment, in which the studied effects of salt in solutions were approximated in the form of first-order polynomials.

Results. By comparing the first coefficients of the polynomial models, a significant effect of sodium chloride on the rheological and filtration properties of solutions and the stickiness of their filtration films was revealed. The effect of chlorides on a group of eight solutions in different oil fractions was statistically confirmed, for which the Student and Mann–Whitney criteria were used. The paper introduces the graphical interpretation of some approximations of the equations of the solution ingredients interaction effect on the response value.

Key words:

lubricating additives, drilling fluid, rheological and tribotechnical properties of drilling mud, coefficient of stickiness of the filtration crust.

REFERENCES

- Korolev A.S. Analiz vliyaniya na koeffitsient treniya smazochnoy dobavki dlya burovnykh rastvorov ESD-1 [Analysis vliyaniya na koeffitsient treniya smazochnoy dobavki dlya burovnykh rastvorov ESD-1]. *Problemy razrabotki mestorozhdeniy uglerodnykh i rudnykh poleznykh iskopaemykh*, 2016, no. 1, pp. 55–58.
- Bulatov A.I., Burykin A.N., Moysa Yu.N. *Prakticheskoe rukovodstvo po promyvke i tsementirovaniyu neftyanykh i gazovykh skvazhin* [Practical guide to flushing and cementing oil and gas wells]. Krasnodar, Prosveshchenie-Yug Publ., 2015. 305 p.
- Huzina L.B., Golub S.I. About additives for lubrication of drilling fluids. *Drilling and oil*, 2019, no. 5, pp. 30–33. In Rus.
- Makhoro V.A., Kamenshchikov F.A. New lubricating additives for drilling fluids. *Drilling and oil*, 2003, no. 2, pp. 15–17. In Rus.
- Gu Y., Zhao X., Liu Y., Lv Y. Preparation and tribological properties of dual-coated TiO₂ nanoparticles as water-based lubricant additives. *Journal of nanomaterials*, 2014, vol. 2014, pp. 1–8.
- Bondarenko V.P., Golubev V.G., Zhantsov M.K., Sadyrbayeva A.S., Nadirova Z.H.K., Ainabekov N.B. Investigation of anti-corrosion properties of environmentally safe additives to drilling solutions based on tar of cotton oil. *Chemistry Today*, 2017, vol. 35, no.17, pp. 32–36.
- Mityuk D.Yu., Vinokurov V.A., Frolov V.I. *Fiziko-khimicheskiye osnovy protsessov dobychi nefti* [Physico-chemical bases of oil production processes]. Moscow, Neft i gaz Publ., 2008. 190 p.
- Babayan E.V., Moysa N.Yu. *Burovnye rastvory* [Drilling fluids]. Moscow, Infra-Engineering Publ., 2019. 328 p.
- Marusov M.A., Moysa Yu.N. Modern trends in the use of inhibitory lubricating additives for weighted drilling fluids of the Kuban. *Drilling and oil*, 2021, no. 7–8, pp. 26–29. In Rus.
- Pominova O.V., Grisyuk P.V., Eskin K.V. Modern developments of new highly inhibited systems of drilling fluids. *Drilling and oil*, 2020, no. 6, pp. 32–34. In Rus.
- Mohamadian N., Ghorbani H., Wood D., Hormozi H.K. Rheological and filtration characteristics of drilling fluids enhanced by nanoparticles with selected additives: an experimental study. *Advances in Geo-Energy Research*, 2018, vol. 2 (3), pp. 228–236.
- Singh S., Ahmed R. Vital role of nanopolymers in drilling and stimulations fluid applications. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. Florence, Italy, 2010. pp. 1–7.
- Dong B., Chzhan E., Chzhensun C. Razrabotka i otsenka Ne: mikroemulsionnoy smazki dlya burovnykh rastvorov [Development and evaluation of Ne: microemulsion lubricant for drilling fluids]. *Materialy Mezhdunarodnoy konferentsii po neftyanym i neftekhimicheskim tekhnologiyam* [Proceedings of the international conference on Petroleum and Petrochemical Technologies]. Singapore, 2018. pp. 29–37.
- Hayes J.B. *Water-in-oil microemulsion drilling fluids*. Cox. Patent US4012329A USA, 1977.
- Gu Yue, Zhao Xiuchen, Liu Ying, Lv Yunxia. Preparation and tribological properties of dual-coated tio2 nanoparticles as water-

- based lubricant additives. *Journal of nanomaterials*, 2014, vol. 2014, pp. 1–9.
16. Adler Yu.P., Markova E.V., Granovskiy Yu.V. *Planirovanie eksperimenta pri poiske optimalnykh usloviy* [Experiment planning while searching for optimal conditions]. Moscow, Nauka Publ., 1976. 279 p.
 17. Litvinenko I., Gaisina L., Semenova L., Averkina E., Gabdrakhmanov E. Transformation of institutions of socio-economic development in the conditions of a long-term viral pandemic. *AD ALTA: Journal of Interdisciplinary Research*, 2021, vol. 11, no. 2, S21, pp. 220–224.
 18. Drejper N., Smit G. *Prikladnoy regressionny analiz*. [Applied regression analysis]. 3rd ed. Translated from English. Moscow, Williams Publ., 2007. 912 p.
 19. Kobzar A.I. *Prikladnaya matematicheskaya statistika. Dlya inzhenerov i nauchnykh rabotnikov* [Applied mathematical statistics. For engineers and scientists]. Moscow, FIZMATLIT Publ., 2012. 816 p.
 20. Pen R.Z., Chendylova L.V., Shapiro I.L. Reologicheskie svoystva melovalnykh suspenziy [Rheological properties of chalky suspensions]. *Khimiya rastitelnogo syrya*, 2004, no. 4, pp. 11–15.
 21. Rao K.P., Wei J.J. Performance of a new dry lubricant in the forming of aluminum alloy sheets. *Wear*, 2001, vol. 12, no. 249, pp. 85–92.
 22. Dvornikov M.V., Nutskova M.V., Blinov P.A. Developments made in the field of drilling fluids by saint petersburg mining university. *International journal of engineering, Transactions A: Basics*, 2020, vol. 4, no. 33, pp. 702–711.
 23. Mitrofanova D.V., Zhzhonikova A.A., Surikova Z.V., Sidorenko D.O. Problems of handling synthetic turbine oils based on trixylene phenophosphates. *Environmental protection in the oil and gas complex*, 2019, no. 6 (291), pp. 65–67. In Rus.
 24. Sidorenko D.O., Mitrofanova D.V., Zhitnikova A.A., Surikova Zh.V. Razrabotka tekhnologii polucheniya komponentov burovnykh rastvorov na osnove otrabotannykh ognestoykikh turbinnykh masel [Development of technology for obtaining components of drilling fluids based on spent flame-resistant turbine oils]. *Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Materials of the International Scientific and Practical Conference]. Magas, Ingush State University Publ., 2021. pp. 245–249.

Received: 22 March 2023.

Reviewed: 17 April 2023.

Information about the authors

Anatoly I. Lambin, Cand. Sc., associate professor, Irkutsk National Research Technical University.

Elena V. Averkina, senior lecturer, Irkutsk National Research Technical University.

Anastasia N. Erygina, drilling mud service solutions engineer INK-Service.

Nikita A. Averkin, master's student, Irkutsk National Research Technical University.

УДК 622.276.63

АЛГОРИТМ ОБОСНОВАНИЯ ВЫБОРА ОБЪЕКТОВ ДЛЯ ВНЕДРЕНИЯ ИННОВАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДОБЫЧИ НЕФТИ В УСЛОВИЯХ НИЖНЕМЕЛОВЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

Мухаметшин Вячеслав Вячеславович¹,
vv@of.ugntu.ru

Кулешова Любовь Сергеевна¹,
markl212@mail.ru

¹ Уфимский государственный нефтяной технический университет (филиал в г. Октябрьском),
Россия, 452607, г. Октябрьский, ул. Девонская, 54а.

Актуальность исследования обусловлена значительными остаточными запасами нефти, сосредоточенными в залежах мелового возраста Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции, что требует создания инновационных технологий добычи нефти. Важным моментом при этом является выбор объектов для проведения опытно-промышленных работ. Основным критерием такого выбора является максимально-возможное наличие объектов-аналогов, что позволит эффективно тиражировать технологии с целью повышения технико-экономических показателей объектов со значительной величиной трудноизвлекаемых остаточных запасов нефти.

Цель: создание алгоритма выбора объектов добычи нефти в условиях месторождений Западной Сибири для внедрения инновационных технологий.

Методы: геолого-промысловый анализ, методы из теории распознавания образа при обработке массивов геолого-промыслового материала по залежам, находящимся длительное время в разработке.

Результаты. На основании проведенных исследований предложен алгоритм выбора объектов разработки для внедрения инновационных технологий на объектах нижнего мела Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции. Алгоритм создан на основе сформулированных критериев, которым должен удовлетворять объект (наличие значительного количества объектов-аналогов объекту-полигону по геологическому строению и свойствам пластов и флюидов, влияющих в наибольшей степени на технико-экономические показатели разработки залежей; наличие значительных остаточных или не вовлеченных в активную разработку запасов нефти на залежах-аналогах; наличие алгоритмов идентификации объектов, позволяющих определять степень идентичности объектов и проводить оценку рисков применения новых технологий в условиях объектов-аналогов), а также на основе использования геолого-физических параметров пластов, оказывающих преобладающее влияние на процесс нефтеизвлечения. Выбор объектов-полигонов предлагается проводить в трех вариантах: в пределах нефтегазоносных областей, в пределах стратиграфических систем, в пределах тектонических элементов в зависимости от требований недропользователя. Полученные алгоритмы позволяют выбирать объекты для тиражирования положительных практик, а также повышать успешность реализации инновационных технологий.

Ключевые слова:

Инновационные технологии, залежи нижнего мела, выбор объектов, степень нефтеизвлечения, повышение эффективности разработки, структура запасов.

Введение

В связи с постоянными изменениями структуры запасов нефти в стране и смещением центра тяжести в сторону трудноизвлекаемых [1–3] растет роль и значимость создания инновационных технологий, позволяющих снизить издержки на добычу нефти, увеличить степень выработки запасов, повысить прибыльность предприятий топливно-энергетического комплекса (ТЭК), а также удовлетворить потребность в нефтепродуктах [4–6].

Важное значение при этом имеет выбор объектов, на которых необходимо провести внедрение вновь созданных технологий, их обработку, оценку эффективности и влияния на нее параметров, отражающих геолого-физические и физико-химические свойства пластов и флюидов [7–9], а также оценку влияния изменения параметров технологий на величину эффекта, выраженную через различные показатели [10–12].

В практике такие объекты называются объектами-полигонами и одними из основных требований к их выбору являются:

- наличие значительного количества объектов-аналогов объекту-полигону по геологическому строению и свойствам пластов и флюидов, влияющих в наибольшей степени на технико-экономические показатели разработки залежей;
- наличие значительных остаточных или не вовлеченных в активную разработку запасов нефти на залежах-аналогах;
- наличие алгоритмов идентификации объектов, позволяющих устанавливать степень идентичности объектов и оценку рисков применения новых технологий в условиях объектов-аналогов.

Одними из наиболее перспективных объектов для внедрения инновационных технологий добычи нефти являются залежи в терригенных коллекторах Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции (ЗСНГП) мелового возраста [13–15]. Именно здесь имеют место колоссальные остаточные запасы нефти, отнесенные к категории трудноизвлекаемых на месторождениях, находящихся длительное время в разработке [16–18], а также многочисленные залежи, не введен-

ные в разработку ввиду низкой рентабельности их эксплуатации [19–21]. Именно здесь, как показало группирование [22–24], имеется значительное количество однородных групп-объектов, дифференцированных по параметрам, отражающим геолого-физические и физико-химические свойства пластов и насыщающих их флюидов, в пределах которых выделяются значительное количество залежей-аналогов. Именно здесь крайне необходимо создать алгоритм поиска объектов-полигонов для разработки инновационных технологий добычи нефти с целью эффективного использования этого колоссального резерва добычи нефти в стране.

Методы и материалы

Объекты нижнего мела ЗСНГП, рассмотренные в работах [22–24], приурочены к продуктивным пластам альбского (al), аптского (a), барремского (br), готеривского (g), валанжинского (v) ярусов и ачимовской (Ач) толщи Верхнепурского (ВВ) вала; Ярсомовского (ЯП) прогиба; Красноленинского (КС), Сургутского (СУС), Нижневартовского (НС), Северного (СЕС) сводов; Северо-Вартовской (СВМ), Надымской (НМ), Северо-Сургутской (ССМ) моноклиналей; Большехетской впадины (БВ) и находятся в пределах Приуральской (ПНГО), Фроловской (ФНГО), Среднеобской (СНГО), Надым-Пурской (НПНГО), Пур-Тазовской (ПТНГО) нефтегазоносных областей.

Группирование [22, 23, 25] более чем 300 объектов разработки с использованием факторного и дискриминантного анализов [26–28] проводилось по параметрам, которые во многом определяют технико-экономические показатели разработки [29, 30].

Результаты и обсуждения

Полученные результаты группирования позволили создать алгоритм выделения объекта-полигона для апробации предложенных технологий в группах объектов из реализованной выборки для повышения эффективности эксплуатации объектов, приуроченных к залежам мелового возраста. Этот алгоритм базируется на определении наиболее близко расположенного объекта к ближайшему центроиду на основе использования рис. 1, 2, зависимостей (1)–(3). При этом на рис. 1 геометрически определялся объект, наиболее близко расположенный к центру группирования. По каждому объекту по формуле (4) на плоскости в координатах канонических дискриминантных функций (КДФ) y_1 и y_2 определяется расстояние до центра группы.

$$y = -740,6 + 0,16H_{\text{зал}} + 0,24H_{\text{общ}} + 1,19H_3 + 835,2m_1 - 3,92K_{\text{н}} - 0,03K_{\text{прон}} - 24,1K_{\text{н}} + 0,66K_{\text{р}} + 1,84t_{\text{пл}} - 9,7P_{\text{пл}} - 27,7\mu_{\text{н}} + 746,0\rho_{\text{н}} + 242,3\beta + 9,02S + 4,12P + 3,37P_{\text{нас}} - 0,20G + 299,2\mu_{\text{в}} + 15,5\mu_{\text{о}}; \quad (1)$$

$$y_1 = -1812 + 0,27H_{\text{зал}} + 0,83H_{\text{общ}} - 0,70H_3 + 1637m_1 - 58,4K_{\text{н}} - 0,07K_{\text{прон}} + 11,6K_{\text{н}} - 0,37K_{\text{р}} + 3,23t_{\text{пл}} - 2,25P_{\text{пл}} - 11,5\mu_{\text{н}} + 1322\rho_{\text{н}} + 1272\beta + 13,2S + 1,43P + 6,4P_{\text{нас}} - 2,47G + 509\mu_{\text{в}} + 9,1\mu_{\text{о}}; \quad (2)$$

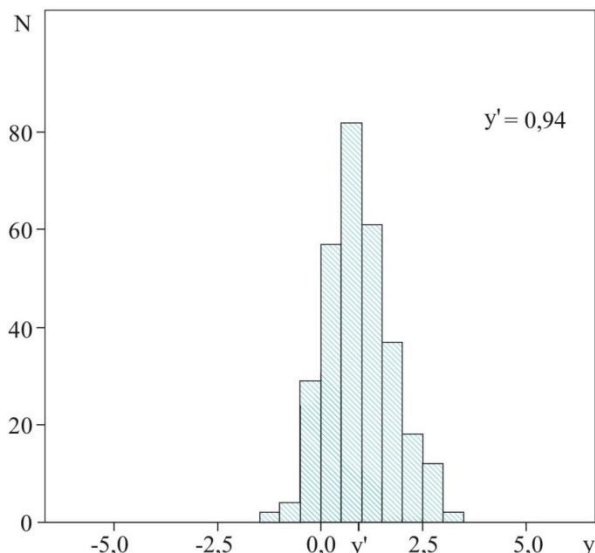


Рис. 1. Распределение объектов (N) по интервалам изменения значений КДФ (y): y' – центроид

Fig. 1. Facilities distribution (N) over the values of canonical discriminant functions (CDF) intervals change: y' – centroid

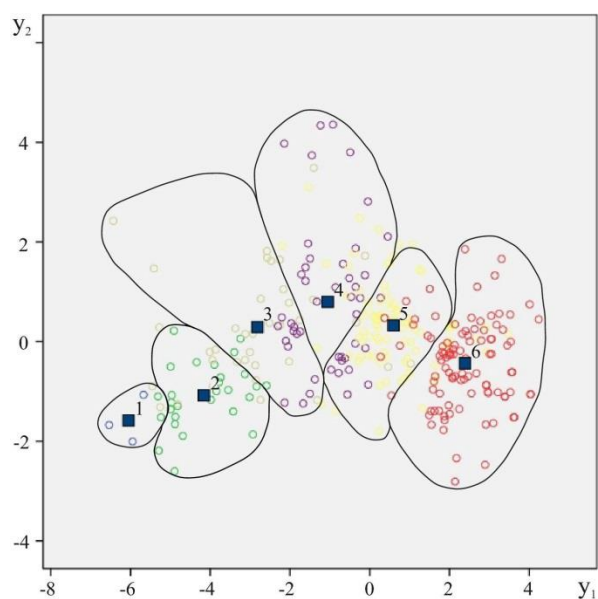


Рис. 2. Размещение объектов в осях КДФ: $\circ$; $\square$; $\triangle$; $\diamond$; $\star$; $\times$; $\circ$; $\square$; $\triangle$; $\diamond$; $\star$; $\times$ – объекты соответственно альбского, аптского, барремского, готеривского, валанжинского ярусов и ачимовской толщи; $\blacksquare$ – центры и зоны группирования

Fig. 2. Facilities placement in the CDF axes: $\circ$; $\square$; $\triangle$; $\diamond$; $\star$; $\times$; $\circ$; $\square$; $\triangle$; $\diamond$; $\star$; $\times$ – the facilities of the Albian, Aptian, Barremian, Hauterivian, Valanginian stages and Achimov sequence respectively; $\blacksquare$ – centers and grouping zones

$$y_2 = -1896 + 0,29H_{\text{зал}} + 0,78H_{\text{общ}} - 0,54H_3 + 1620m_1 - 58,5K_{\text{н}} - 0,06K_{\text{прон}} + 9,5K_{\text{н}} - 0,48K_{\text{р}} + 3,3t_{\text{пл}} - 2,55P_{\text{пл}} - 9,53\mu_{\text{н}} + 1383\rho_{\text{н}} + 1318\beta + 17,9S - 0,02P + 5,5P_{\text{нас}} - 2,6G + 482\mu_{\text{в}} + 6,6\mu_{\text{о}}; \quad (3)$$

где $H_{\text{зал}}$ – глубина залегания, м; $P_{\text{пл}}$ – начальное пластовое давление, МПа; $t_{\text{пл}}$ – температура, °С; $H_{\text{общ}}$ – общая и H_z – эффективная нефтенасыщенная толщины пласта, м; коэффициенты: m_r – пористости, д. ед., K_n – нефтенасыщенности, д. ед., $K_{\text{прон}}$ – проницаемости, 10^{-3} мкм², K_p – песчанности, д. ед., K_p – расчлененности; ρ_n – плотность, кг/м³, μ_n – вязкость, мПа·с; μ_o – относительная вязкость пластовой нефти; β – объемный коэффициент, д. ед.; G – газосодержание, м³/т; $P_{\text{нас}}$ – давление насыщения нефти, МПа; S – содержание сероводорода и P – парафина в нефти, %; μ_v – вязкость пластовой воды, мПа·с.

$$d_j = \sqrt{\sum_{i=1}^m (y_i - y_i^j)^2}, \quad (4)$$

где d_j – евклидово расстояние между объектом и центром группирования; y_i – значение i -й КДФ; y_i^j – значение i -й КДФ j -го центроида; m – количество КДФ.

Объект-полигон при этом для внедрения новых технологий выбирается по минимальным значениям d_j .

Выбор полигонов в пределах нефтегазоносных областей (НГО) производится по той же схеме с использованием рис. 3, зависимостей (5), (6), а выбор в пределах различных ярусов и толщ – с использованием рис. 4, зависимостей (7), (8).

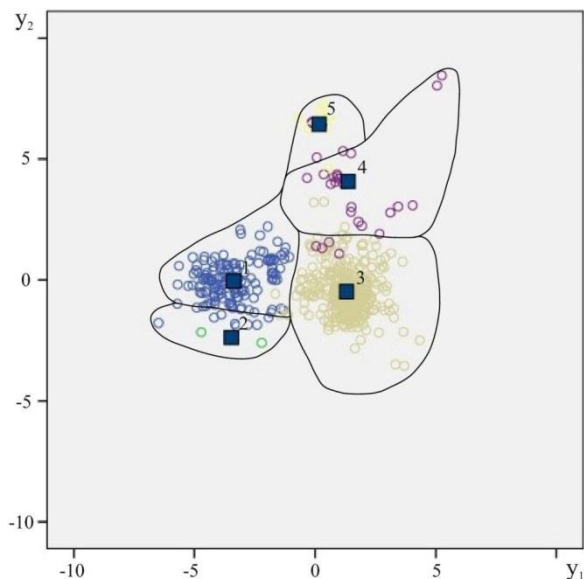


Рис. 3. Размещение объектов в осях КДФ y_1 – y_2 : $\circ$; $\circ$; $\circ$; $\circ$; $\circ$ – объекты, приуроченные к Приуральской, Фроловской, Среднеобской, Надым-Пурской, Пур-Тазовской нефтегазоносным областям соответственно; $\square$ – зоны групп объектов и центры группирования

Fig. 3. Facilities placement in the CDF axes: $\circ$; $\circ$; $\circ$; $\circ$; $\circ$; $\circ$ – facilities associated with the Cisuralian, Frolov, Sredneobsk, Nadym-Pursk, Pur-Taz oil and gas regions, respectively; $\square$ – zones of facilities groups and grouping centers

Предложенные алгоритмы позволяют определять общее направление стратегии повышения эффективности эксплуатации объектов, разбуренных достаточ-

но плотно сеткой скважин и разрабатываемых длительные время, а также стратегию увеличения темпов ввода залежей в активную разработку.

$$y_1 = -838 + 0,18H_{\text{зал}} + 0,26H_{\text{общ}} + 0,53H_z + 1038m_r + 64,6K_n + 0,01K_{\text{прон}} - 20,5K_p - 0,35K_p + 1,49t_{\text{пл}} - 7,44P_{\text{пл}} - 24,0\mu_n + 944\rho_n + 277\beta + 16,5S + 3,7P + 2,4P_{\text{нас}} - 0,06G + 234\mu_v + 12,8\mu_o; \quad (5)$$

$$y_2 = -834 + 0,18H_{\text{зал}} + 0,40H_{\text{общ}} + 1,11H_z + 1120m_r - 77K_n - 0,01K_{\text{прон}} - 25,3K_p - 0,05K_p + 2,1t_{\text{пл}} - 8P_{\text{пл}} - 13,7\mu_n + 886\rho_n + 237\beta + 16S + 3,2P + 1,44P_{\text{нас}} + 0,10G + 232\mu_v + 12,8\mu_o. \quad (6)$$

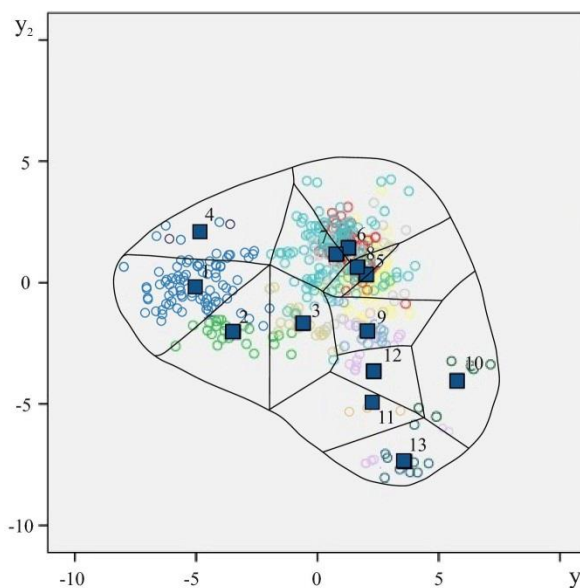


Рис. 4. Распределение объектов в осях КДФ y_1 – y_2 : $\circ$; $\circ$; $\circ$; $\circ$; $\circ$; $\circ$; $\circ$; $\circ$; $\circ$; $\circ$; $\circ$; $\circ$; $\circ$ – объекты, входящие в состав Шаимского вала, Верхнекондинского прогиба, Шеркалинского прогиба, Красноленинского свода, Северо-Вартовской моноклинали, Surgutского свода, Нижневартовского свода, Ярсомовского прогиба, Северо-Сургутской моноклинали, Надымской моноклинали, Северного свода, Большехетской впадины; $\square$ – зоны групп объектов и центры группирования

Fig. 4. Facilities placement in the y_1 – y_2 CDF axes: $\circ$; $\circ$; $\circ$; $\circ$; $\circ$; $\circ$; $\circ$; $\circ$; $\circ$; $\circ$; $\circ$; $\circ$; $\circ$ – facilities that are part of the Shaime arch, Verkhnekondinsk deflection, Sherkalinsk deflection, Krasnoleninsk arch, Severo-Vartovsk monocline, Surgut arch, Nizhnevartovsk arch, Yarsomovsk deflection, Severo-Surgut monocline, Nadym monocline, Northern arch, Bolshshekhtsk depression; $\square$ – zones of groups of facilities and grouping centers

$$y_1 = -1040 + 0,15H_{\text{зал}} + 0,09H_{\text{общ}} - 0,59H_z + 1239m_r - 115K_n + 0,01K_{\text{прон}} - 14,6K_p - 0,21K_p + 2,4t_{\text{пл}} - 4,7P_{\text{пл}} - 18,9\mu_n + 1178\rho_n + 310\beta + 26,7S + 3,4P + 1,9P_{\text{нас}} - 0,05G + 252\mu_v + 10,5\mu_o; \quad (7)$$

$$y_2 = -992 + 0,15H_{\text{зал}} + 0,02H_{\text{общ}} - 0,4H_3 + 1189m_{\text{г}} - 94K_{\text{н}} + 0,01K_{\text{прон}} - 15,4K_{\text{п}} - 0,09K_{\text{р}} + 2,2t_{\text{пл}} - 4,7P_{\text{пл}} - 24\mu_{\text{н}} + 1151\rho_{\text{н}} + 293\beta + 15,8S + 3,7P + 2,5P_{\text{нас}} - 0,06G + 237\mu_{\text{в}} + 12,5\mu_{\text{о}}. \quad (8)$$

Для решения различного набора задач разработки, возникающих в процессе эксплуатации объекта, для выбора полигонов могут быть использованы рис. 5, уравнения (9), (10). При этом количество полигонов значительно увеличивается.

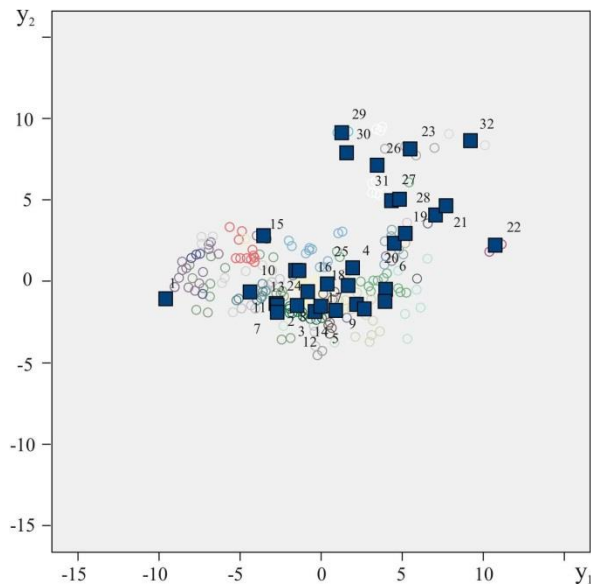


Рис. 5. Размещение объектов и центроидов в КДФ y_1 - y_2 . Объекты и их центроиды, приуроченные к: 1 – КС (al); 2 – СВМ (a); 3 – СВМ (br); 4 – СВМ (g); 5 – СВМ (v); 6 – СВМ (Ач); 7 – СУС (g); 8 – СУС (v); 9 – СУС (Ач); 10 – НС (a); 11 – НС (br); 12 – НС (v); 13 – НВ (g); 14 – НВ (Ач); 15 – ЯП (br); 16 – ЯП (v); 17 – ЯП (Ач); 18 – ССМ (v); 19 – ССМ (ЮО); 20 – ССМ (Ач); 21 – НМ (g); 22 – НМ (v); 23 – СЕС (v); 24 – ВВ (a); 25 – ВВ (g); 26 – ВВ (br); 27 – ВВ (v); 28 – ВВ (Ач); 29 – ВВ (al); 30 – ВВ (a); 31 – ВВ (g); 32 – ВВ (v); ■ – центроид группы

Fig. 5. Facilities and centroids placement in in the y_1 - y_2 CDF. Facilities and their centroids, confined to: 1 – КС (al); 2 – СВМ (a); 3 – СВМ (br); 4 – СВМ (g); 5 – СВМ (v); 6 – СВМ (Ач); 7 – СУС (g); 8 – СУС (v); 9 – СУС (Ач); 10 – НС (a); 11 – НС (br); 12 – НС (v); 13 – НВ (g); 14 – НВ (Ач); 15 – ЯП (br); 16 – ЯП (v); 17 – ЯП (Ач); 18 – ССМ (v); 19 – ССМ (ЮО); 20 – ССМ (Ач); 21 – НМ (g); 22 – НМ (v); 23 – СЕС (v); 24 – ВВ (a); 25 – ВВ (g); 26 – ВВ (br); 27 – ВВ (v); 28 – ВВ (Ач); 29 – ВВ (al); 30 – ВВ (a); 31 – ВВ (g); 32 – ВВ (v); ■ – the centroid of the group

$$y_1 = -16,6 + 0,01H_{\text{зал}} - 0,001H_{\text{общ}} + 0,07H_3 - 0,13m_{\text{г}} - 4,7K_{\text{н}} + 0,0004K_{\text{прон}} + 0,78K_{\text{п}} + 0,004K_{\text{р}} - 0,08t_{\text{пл}} + 0,44P_{\text{пл}} + 0,69\mu_{\text{н}} + 3,3\rho_{\text{н}} + 2,8\beta - 0,72S - 0,17P + 0,17P_{\text{нас}} - 0,01G - 9,7\mu_{\text{в}} - 0,33\mu_{\text{о}}; \quad (9)$$

$$y_2 = -5,95 - 0,002H_{\text{зал}} + 0,002H_{\text{общ}} + 0,043H_3 - 24,3m_{\text{г}} + 4,34K_{\text{н}} + 0,0003K_{\text{прон}} + 0,33K_{\text{п}} - 0,025K_{\text{р}} - 0,017t_{\text{пл}} - 0,03P_{\text{пл}} + 0,64\mu_{\text{н}} + 12,1\rho_{\text{н}} - 0,56\beta - 2,15S + 0,18P + 0,48P_{\text{нас}} + 0,01G + 1,14\mu_{\text{в}} - 0,35\mu_{\text{о}}. \quad (10)$$

Анализ показал, что алгоритм выбора объектов по одиннадцати группам является наилучшим. При этом устраняются недостатки предыдущих алгоритмов.

Применение этого алгоритма основано на использовании рис. 6 и зависимостей (11) и (12).

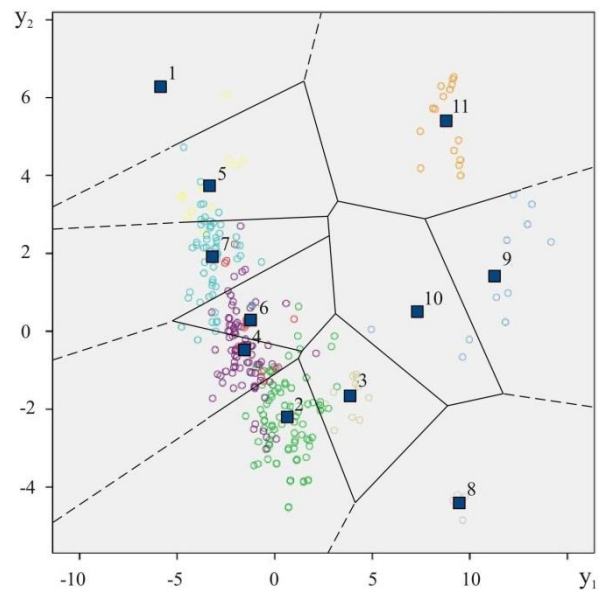


Рис. 6. Размещение объектов в осях КДФ с использованием 11-ти групп; [9] – центр группирования

Fig. 6. Facilities placement in the CDF axes using 11 groups; [9] – grouping center

$$y_1 = -1889 + 0,12H_{\text{зал}} + 0,96H_{\text{общ}} - 1,88H_3 + 1008m_{\text{г}} + 9,3K_{\text{н}} - 0,06K_{\text{прон}} + 63,8K_{\text{п}} + 0,22K_{\text{р}} + 1,73t_{\text{пл}} + 1,68P_{\text{пл}} - 31,7\mu_{\text{н}} + 1549\rho_{\text{н}} + 1337\beta + 22,3S + 18,9P + 7,9P_{\text{нас}} - 1,85G + 521\mu_{\text{в}} + 22,7\mu_{\text{о}}; \quad (11)$$

$$y_2 = -1932 + 0,15H_{\text{зал}} + 0,36H_{\text{общ}} - 1,29H_3 + 1131m_{\text{г}} - 45,7K_{\text{н}} - 0,05K_{\text{прон}} + 53,0K_{\text{п}} + 1,32K_{\text{р}} + 0,62t_{\text{пл}} + 7,06P_{\text{пл}} - 35,0\mu_{\text{н}} + 1632\rho_{\text{н}} + 1378\beta + 26,7S + 7,1P + 8,2P_{\text{нас}} - 1,92G + 422\mu_{\text{в}} + 16,8\mu_{\text{о}}. \quad (12)$$

Выводы

1. Предложен алгоритм выбора объектов разработки для внедрения инновационных технологий на объектах нижнего мела Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции. Алгоритм создан на основе сформулированных критериев, которым должен удовлетворять объект, а также на основе

использования геолого-физических параметров пластов, оказывающих преобладающее влияние на процесс нефтеизвлечения.

2. Выбор объектов-полигонов предлагается проводить в трех вариантах: в пределах нефтегазоносных областей, в пределах стратиграфических си-

стем, в пределах тектонических элементов в зависимости от требований недропользователя.

3. Полученные алгоритмы позволяют выбирать объекты для тиражирования положительных практик, а также повышать успешность реализации инновационных технологий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Yakupov R.F., Mukhametshin V.Sh., Tyncherov K.T. Filtration model of oil coning in a bottom water-drive reservoir // *Periodico Tchê Quimica*. – 2018. – V. 15. – Iss. 30. – P. 725–733.
2. Инновационные технологии разработки низкопроницаемых коллекторов в ПАО «НК «Роснефть» / А.В. Мирошниченко, А.В. Сергейчев, В.А. Коротовских, К.В. Торопов, М.Г. Волков, М.С. Антонов, А.Э. Федоров // *Нефтяное хозяйство*. – 2022. – № 10. – С. 105–109. DOI: 10.24887/0028-2448-2022-12-105-109
3. Grishchenko V.A., Mukhametshin V.Sh., Rabaev R.U. Geological structure features of carbonate formations and their impact on the efficiency of developing hydrocarbon deposits // *Energies*. – 2022. – V. 15. – Iss. 23. – 9002. – P. 1–11. DOI: 10.3390/en15239002
4. Economic analysis and risk management in development of tight-low permeability reservoir / Tao Yu, Baozhu Li, Zhengdong Lei, Xiaoping An, Wenhuan Wang, Jun Jiao, Jianfeng Hou, Xiaosong Bo // *SPE/IATMI Asia Pacific Oil & Gas Conference and Exhibition*. – Bali, Indonesia, October 2019. DOI: 10.2118/196345-MS
5. Обоснование необходимости учета интерференции между скважинами при разражении сетки скважин на пашийском горизонте Бавлинского месторождения / И.Н. Хакимзянов, В.Ш. Мухаметшин, Р.Н. Бахтизин, А.В. Лифантьев, Р.И. Шешдилов // *SOCAR Proceedings*, специальный выпуск. – 2021. – № 1. – С. 77–87. DOI: 10.5510/OGP2021SI100512.
6. Delamaide E. Application of multilateral wells for production and enhanced oil recovery: case studies from Canada // *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*. – 2021. – V. 24. – № 4. – P. 952–974. DOI: 10.2118/206745-PA
7. Использование методов кластеризации при моделировании гидроразрыва пласта / Д.Р. Ардисламова, К.Р. Кадырова, С.И. Сыпченко, А.И. Федоров, С.С. Хабиров, И.В. Синяков, Б.О. Михайлов // *Нефтяное хозяйство*. – 2019. – № 10. – С. 112–117. DOI: 10.24887/0028-2448-2022-11-112-117
8. Setya Wardhana B.A., Titaley G.S., Purwatiningsih N. An integrated geological approach for a successful waterflood implementations and EOR planning: lesson learned from T field development, Barito Basin, Indonesia // *Society of Petroleum Engineers – SPE/IATMI Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition*. – Bali, Indonesia, October 2019. DOI: 10.2118/196301-ms
9. Обзор мировых проектов полимерных методов увеличения нефтеотдачи / Р.Р. Ибатуллин, Ш.К. Гаффаров, М.Р. Хисаметдинов, Л.И. Минихайров // *Нефтяное хозяйство*. – 2022. – № 7. – С. 32–37. DOI: 10.24887/0028-2448-2022-7-32-37.
10. Setya Wardhana B.A., Titaley G.S., Purwatiningsih N. An integrated geological approach for a successful waterflood implementations and EOR planning: lesson learned from T field development, Barito Basin, Indonesia // *Society of Petroleum Engineers – SPE/IATMI Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition*. – Bali, Indonesia, October 2019. DOI: 10.2118/196301-ms.
11. Методический подход к определению оптимальных геолого-технологических характеристик при планировании ГРП на многопластовых объектах / В.А. Грищенко, Р.У. Рабаев, И.Н. Асылгареев, В.Ш. Мухаметшин, Р.Ф. Якупов // *SOCAR Proceedings*. – 2021. – Специальный выпуск. – № 2. – С. 182–191. DOI: 10.5510/OGP2021SI200587.
12. Study and apply the advanced analysis algorithm to screen the optimal enhanced oil recovery solution for oil and gas fields in Viet Nam / Long Hoang, Thang Viet Trinh, Truong Hung Trieu, Quy Minh Nguyen, Ngoc Quy Pham, Hien Huy Doan, Linh Hoang // *Journal of Mining and Earth Sciences*. – 2021. – V. 62. – Iss. 3a. – P. 17–29. DOI: 10.46326/jmes.2021.62(3a).03
13. Amble extending production life of mature fields in the North Sea with multilateral technology / M. Kelsey, M. Raaholt, O. Einervoll, R. Nafikov, S. Day // *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. – Dubai, UAE, September 2021. DOI: 10.2118/205874-MS
14. Обоснование оптимального расстояния между скважинами при разработке коллекторов ачимовской толщи / И.В. Шпуров, В.Г. Браткова, В.С. Васильева, Л.С. Бриллиант, Д.В. Горбунова, М.Ю. Данько, Д.Е. Васильев, Я.А. Селютин // *Нефтяное хозяйство*. – 2021. – № 11. – С. 80–84. DOI: 10.24887/0028-2448-2022-2-80-84
15. Опыт применения горизонтальных скважин с многостадийным гидроразрывом в условиях низкопроницаемого нефтяного пласта / С.В. Арефьев, И.С. Соколов, М.С. Павлов, О.Н. Босых, Е.Д. Городилова // *Нефтяное хозяйство*. – 2022. – № 9. – С. 90–95. DOI: 10.24887/0028-2448-2022-9-90-95
16. Бембель С.Р. Геологические модели и перспективы нефтегазоносности территории восточной части Краснотеннинского свода // *Нефтяное хозяйство*. – 2018. – № 10. – С. 74–78. DOI: 10.24887/0028-2448-2022-11-74-78
17. Экспресс-оценка прироста коэффициента извлечения нефти в результате применения водогазовых методов увеличения нефтеотдачи / А.В. Аржиловский, Д.Г. Афонин, А.А. Ручкин, А.В. Кобяшев, Н.А. Морозовский, К.В. Торопов // *Нефтяное хозяйство*. – 2022. – № 9. – С. 63–67. DOI: 10.24887/0028-2448-2022-9-63-67
18. Технологии вовлечения в разработку сложнопостроенного объекта АВ11-2 «рябчик» Самотлорского месторождения / М.Л. Бабаев, И.В. Савченко, А.А. Шкитин, А.А. Писарев, Д.С. Смирнов, Д.Ю. Писарев // *Нефтяное хозяйство*. – 2017. – № 9. – С. 24–29. DOI: 10.24887/0028-2448-2022-10-24-29
19. Аналитические связи между фильтрационно-емкостными параметрами продуктивных пластов Западной Сибири на основе обобщенной математической модели капиллярных кривых / В.В. Мухаметшин, Р.Т. Ахметов, Л.С. Кулешова, О.А. Грезина // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2021. – Т. 332. – № 8. – С. 135–141. DOI: 10.18799/24131830/2021/8/3311.
20. Обоснование аналитической модели гидравлической извилистости поровых каналов коллекторов Западной Сибири по данным капиллярных исследований / Р.Т. Ахметов, Л.С. Кулешова, Э.Ф. Велиев, В.В. Мухаметшин, А.Р. Сафиуллина // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2022. – Т. 333. – № 7. – С. 86–95. DOI: 10.18799/24131830/2022/7/3587.
21. Интеграция методов машинного обучения и геолого-гидродинамического моделирования при проектировании разработки месторождений / Л.С. Бриллиант, А.С. Завьялов, М.Ю. Данько, К.А. Андонов, И.В. Шпуров, В.Г. Браткова, А.В. Давыдов // *Нефтяное хозяйство*. – 2019. – № 10. – С. 48–53. DOI: 10.24887/0028-2448-2022-3-48-53
22. Мухаметшин В.В. Повышение эффективности управления разработкой залежей Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции на основе дифференциации и группирования // *Геология и геофизика*. – 2021. – Т. 62. – № 12. – С. 1672–1685. DOI: 10.15372/GiG2021102.
23. Мухаметшин В.В. Обоснование трендов повышения степени выработки запасов нефти нижнемеловых отложений Западной Сибири на основе идентификации объектов // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2018. – Т. 329. – № 5. – С. 117–124.
24. Мухаметшин В.В. Повышение эффективности управления объектами добычи нефти с использованием метода аналогий // *SOCAR Proceedings*. – 2020. – № 4. – С. 42–50. DOI: 10.5510/OGP20200400464.

25. Группирование эксплуатационных объектов на основе параметров обобщенной модели кривых капиллярного давления на примере ряда нефтяных месторождений Западной Сибири / Р.Т. Ахметов, В.В. Мухаметшин, Л.С. Кулешова, О.А. Грезина // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 11. – С. 89–97. DOI: 10.18799/24131830/2021/11/3084.
26. Gheorghiu Sorin Alexandru, Cătălin Popescu. Quantifying economic uncertainties and risks in the oil and gas industry // Recent Applications of Financial Risk Modelling and Portfolio Management. – 2021. – P. 31. DOI: 10.4018/978-1-7998-5083-0.ch008
27. Мухаметшин В.Ш., Хакимзянов И.Н. Особенности группирования низкопродуктивных залежей нефти в карбонатных коллекторах для рационального использования ресурсов в пределах Урало-Поволжья // Записки Горного института. – 2021. – Т. 252. – С. 896–907. DOI: 10.31897/PMI.2021.6.11
28. Андреев А.В., Мухаметшин В.Ш., Котенёв Ю.А. Прогнозирование продуктивности залежей в карбонатных коллекторах с трудноизвлекаемыми запасами // SOCAR Proceedings. – 2016. – № 3. – С. 40–45. DOI: 10.5510/OGP20160300287.
29. Risk measurement of international oil and gas projects based on the Value at Risk method / Cheng Cheng, Zhen Wang, Ming-Ming Liu, Xiao-Hang Ren // Petroleum Science. – 2018. – V. 16. – P. 199–216. DOI: 10.1007/s12182-018-0279-1
30. Key geological factors controlling the estimated ultimate recovery of shale oil and gas: a case study of the Eagle Ford shale, Gulf Coast Basin, USA / Lianhua Hou, Zhichao Yu, Xia Luo, Senhu Lin, Zhongying Zhao, Zhi Yang, Songtao Wu, Jingwei Cui, Lijun Zhang // Petroleum Exploration and Development. – 2021. – V. 48. – Iss. 3. – P. 762–774. DOI:10.1016/s1876-3804(21)60062-9

Поступила: 13.03.2023 г.

Прошла рецензирование: 28.03.2023 г.

Информация об авторах

Мухаметшин В.В., доктор технических наук, профессор кафедры разведки и разработки нефтяных и газовых месторождений, Институт нефти и газа, Уфимский государственный нефтяной технический университет (филиал в г. Октябрьском).

Кулешова Л.С., кандидат технических наук, доцент кафедры разведки и разработки нефтяных и газовых месторождений, заместитель директора по УР, Институт нефти и газа, Уфимский государственный нефтяной технический университет (филиал в г. Октябрьском).

UDC 622.276.63

ALGORITHM FOR SUBSTANTIATING FACILITIES SELECTION FOR INTRODUCTION OF OIL PRODUCTION INNOVATIVE TECHNOLOGIES IN THE CONDITIONS OF THE LOWER CRETACEOUS DEPOSITS OF WESTERN SIBERIA

Vyacheslav V. Mukhametshin¹,
vv@of.ugntu.ru

Lyubov S. Kuleshova¹,
markl212@mail.ru

¹ Ufa State Petroleum Technological University (Branch in the City of Oktyabrsky),
54a, Devonskaya street, Oktyabrsky, 452607, Russia.

The research relevance is caused by significant residual oil reserves, concentrated in Cretaceous deposits of the West Siberian oil and gas province, which require the creation of innovative oil production technologies. The important issue in this case is the selection of facilities for experimental industrial work. The main criterion for such selection is the maximum possible analog facilities availability, which will allow efficient technologies replication to improve the technical and economic indicators of facilities with a significant amount of hard-to-recover residual oil reserves.

The aim of the research is to create an algorithm for selecting oil production facilities in the conditions of the Western Siberia fields for innovative technologies implementation.

Methods: geological and commercial analysis, methods from the image recognition theory when processing geological and commercial material arrays for deposits that have been in development for a long time.

Results. The authors proposed an algorithm for selecting development facilities for implementation of innovative technologies at the Lower Cretaceous facilities of the West Siberian oil and gas province. This algorithm creation is based on the formulated criteria that the facility must satisfy (a significant number of facilities analogous to the landfill one in terms of the geological structure and formations and fluid properties affecting to the greatest extent the technical and economic indicators of the deposits development; presence of significant residual or not actively involved in the development oil reserves in analogue deposits; presence of facility identification algorithms, which allow establishing the facilities identity degree and assessing risks when applying new technologies in the conditions of analogue facilities). The selection of polygon objects is proposed to be carried out in three variants: within oil and gas-bearing areas, within stratigraphic systems, within tectonic elements, depending on the requirements of the subsurface user. The obtained algorithms make it possible to select objects for replication of positive practices, as well as to increase the success of the implementation of innovative technologies

Key words:

Innovative technologies, deposits of the Lower Cretaceous, selection of facilities, oil recovery degree, development efficiency improving, structure of reserves.

REFERENCES

1. Yakupov R.F., Mukhametshin V.Sh., Tyncherov K.T. Filtration model of oil coning in a bottom water-drive reservoir. *Periodico Tche Quimica*, 2018, vol. 15, Iss. 30, pp. 725–733.
2. Miroshnichenko A.V., Sergeichev A.V., Korotovskikh V.A., Topopov K.V., Volkov M.G., Antonov M.S., Fedorov A.E. Innovative technologies for the low-permeability reservoirs development in Rosneft Oil Company. *Oil Industry*, 2022, no. 10, pp. 105–109. In Rus. DOI: 10.24887/0028-2448-2022-12-105-109.
3. Grishchenko V.A., Mukhametshin V.Sh., Rabaev R.U. Geological structure features of carbonate formations and their impact on the efficiency of developing hydrocarbon deposits. *Energies*, 2022, vol. 15, Iss. 23, 9002, pp. 1–11. DOI: 10.3390/en15239002
4. Tao Yu, Baozhu Li, Zhengdong Lei, Xiaoping An, Wenhuan Wang, Jun Jiao, Jianfeng Hou, Xiaosong Bo. Economic analysis and risk management in development of tight-low permeability reservoir. *SPE/IATMI Asia Pacific Oil & Gas Conference and Exhibition*. Bali, Indonesia, October 2019. DOI: 10.2118/196345-MS
5. Khakimzyanov I.N., Mukhametshin V.Sh., Bakhtizin R.N., Lifantsev A.V., Sheshdirov R.I. Justification of necessity to consider well interference in the process of well pattern widening in the Bavlinskoye Oil Field Pashiyani Formation. *SOCAR Proceedings, Special Issue*, 2021, no. 1, pp. 77–87. In Rus. DOI: 10.5510/OGP2021SI100512.
6. Delamaide E. Application of multilateral wells for production and enhanced oil recovery: case studies from Canada. *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*, 2021, vol. 24, no. 4, pp. 952–974. DOI: 10.2118/206745-PA
7. Ardislamova D.R., Kadyrova K.R., Sypchenko S.I., Fedorov A.I., Khabirov S.S., Siniakov I.V., Mikhailov B.O. Using clustering methods in hydraulic fracturing modeling. *Oil Industry*, 2019, no. 10, pp. 112–117. In Rus. DOI: 10.24887/0028-2448-2022-11-112-117
8. Setya Wardhana B.A., Titaley G.S., Purwatiningsih N. An integrated geological approach for a successful waterflood implementations and EOR planning: Lesson learned from T field development, Barito Basin, Indonesia. *Society of Petroleum Engineers – SPE/IATMI Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition*. Bali, Indonesia, October 2019. DOI: 10.2118/196301-ms
9. Ibatullin R.R., Gaffarov Sh.K., Khisametdinov M.R., Minikhaev L.I. Review of world polymer flooding EOR projects. *Oil Industry*, 2022, no. 7, pp. 32–37. In Rus. DOI: 10.24887/0028-2448-2022-7-32-37.
10. Setya Wardhana B.A., Titaley G.S., Purwatiningsih N. An integrated geological approach for a successful waterflood implementations and EOR planning: lesson learned from T field development, Barito Basin, Indonesia. *Society of Petroleum Engineers – SPE/IATMI Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition*. Bali, Indonesia, October 2019. DOI: 10.2118/196301-ms.
11. Grishchenko V.A., Rabaev R.U., Asylgareev I.N., Mukhametshin V.Sh., Yakupov R.F. Methodological approach to optimal geological and technological characteristics determining when planning hydraulic fracturing at multilayer facilities. *SOCAR Proceedings*, 2021, Special Issue, no. 2, pp. 182–191. In Rus. DOI: 10.5510/OGP2021SI200587.
12. Long Hoang, Thang Viet Trinh, Truong Hung Trieu, Quy Minh Nguyen, Ngoc Quy Pham, Hien Huy Doan, Linh Hoang. Study and apply the advanced analysis algorithm to screen the optimal enhanced oil recovery solution for oil and gas fields in Viet Nam. *Journal of Mining and Earth Sciences*, 2021, vol. 62, Iss. 3a, pp. 17–29. DOI: 10.46326/jmes.2021.62(3a).03

13. Kelsey M., Raaholt M., Einervoll O., Nafikov R., Day S. Amble extending production life of mature fields in the North Sea with multilateral technology. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. Dubai, UAE, September 2021. DOI: 10.2118/205874-MS
14. Shpurov I.V., Bratkova V.G., Vasilieva V.S., Brilliant L.S., Gorbunova D.V., Danko M.U., Vasiliev D.E., Selyutina Ya.A. Evaluating the optimal distance between wells for the Achimov formation. *Oil Industry*, 2021, no. 11, pp. 80–84. In Rus. DOI: 10.24887/0028-2448-2022-2-80-84.
15. Arefiev S.V., Sokolov I.S., Pavlov M.S., Bosykh O.N., Gorodilova E.D. Implementation of horizontal wells with multistage hydraulic fracturing for low-permeability oil reservoir development. *Oil Industry*, 2022, no. 9, pp. 90–95. In Rus. DOI: 10.24887/0028-2448-2022-9-90-95.
16. Bembel S.R. Geological models and hydrocarbon prospects of the eastern part of the Krasnoleninsky arch. *Oil Industry*, 2018, no. 10, pp. 74–78. In Rus. DOI: 10.24887/0028-2448-2022-11-74-78.
17. Arzhilovsky A.V., Afonin D.G., Ruchkin A.A., Kobayashv A.V., Morozovskiy N.A., Toropov K.V. Express assessment of the increase in the oil recovery as a result of water-alternating-gas technology application. *Oil Industry*, 2022, no. 9, pp. 63–67. In Rus. DOI: 10.24887/0028-2448-2022-9-63-67.
18. Babaev M.L., Savchenko I.V., Shkitin A.A., Pisarev A.A., Smirnov D.S., Pisarev D.Yu. Technologies for involvement in the development of the complex reservoir AV11-2 Ryabchik of Samotlorskoye oil field. *Oil Industry*, 2017, no. 9, pp. 24–29. In Rus. DOI: 10.24887/0028-2448-2022-10-24-29.
19. Mukhametshin V.V., Akhmetov R.T., Kuleshova L.S., Grezina O.A. Analytical links between porosity and permeability correlations of productive strata of Western Siberia based on a generalized mathematical model of capillary curves. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 8, pp. 135–141. In Rus. DOI: 10.18799/24131830/2021/8/3311.
20. Akhmetov R.T., Kuleshova L.S., Veliyev E.F., Mukhametshin V.V., Safiullina A.R. Substantiation of an analytical model of reservoir pore channels hydraulic tortuosity in Western Siberia based on capillary research data. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, no. 7, pp. 86–95. In Rus. DOI: 10.18799/24131830/2022/7/3587.
21. Brilliant L.S., Zavialov A.S., Danko M.U., Andronov K.A., Shpurov I.V., Bratkova V.G., Davydov A.V. Integration of machine learning methods and geological and hydrodynamic modeling in field development design. *Oil Industry*, 2019, no. 10, pp. 48–53. In Rus. DOI: 10.24887/0028-2448-2022-3-48-53.
22. Mukhametshin V.V. Improving the efficiency of managing the development of the West Siberian oil and gas province fields on the basis of differentiation and grouping. *Russian Geology and Geophysics*, 2021, vol. 62, no. 12, pp. 1373–1384. DOI: 10.2113/RGG20183871.
23. Mukhametshin V.V. Rationale for trends in increasing oil reserves depletion in Western Siberia cretaceous deposits based on targets identification. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 5, pp. 117–124. In Rus.
24. Mukhametshin V.V. Oil production facilities management improving using the analogy method. *SOCAR Proceedings*, 2020, no. 4, pp. 42–50. In Rus. DOI: 10.5510/OGP20200400464.
25. Akhmetov R.T., Mukhametshin V.V., Kuleshova L.S., Grezina O.A. Production facilities grouping based on the parameters of the capillary pressure curves generalized model on the example of Western Siberia oil fields. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 11, pp. 89–97. In Rus. DOI: 10.18799/24131830/2021/11/3084.
26. Gheorghiu Sorin Alexandru, Cătălin Popescu. Quantifying economic uncertainties and risks in the oil and gas industry. *Recent Applications of Financial Risk Modelling and Portfolio Management*, 2021, pp. 31. DOI: 10.4018/978-1-7998-5083-0.ch008
27. Mukhametshin V.Sh., Khakimzyanov I.N. Features of grouping low-producing oil deposits in carbonate reservoirs for the rational use of resources within the Ural-Volga region. *Journal of Mining Institute*, 2021, vol. 252, pp. 896–907. In Rus. DOI: 10.31897/PMI.2021.6.11
28. Andreev A.V., Mukhametshin V.Sh., Kotenev Yu.A. Deposit productivity forecast in carbonate reservoirs with hard to recover reserves. *SOCAR Proceedings*, 2016, no. 3, pp. 40–45. In Rus. DOI: 10.5510/OGP20160300287.
29. Cheng Cheng, Zhen Wang, Ming-Ming Liu, Xiao-Hang Ren. Risk measurement of international oil and gas projects based on the Value at Risk method. *Petroleum Science*, 2018, vol. 16, pp. 199–216. DOI: 10.1007/s12182-018-0279-1
30. Lianhua Hou, Zhichao Yu, Xia Luo, Senhu Lin, Zhongying Zhao, Zhi Yang, Songtao Wu, Jingwei Cui, Lijun Zhang. Key geological factors controlling the estimated ultimate recovery of shale oil and gas: a case study of the Eagle Ford shale, Gulf Coast Basin, USA. *Petroleum Exploration and Development*, 2021, vol. 48, Iss. 3, pp. 762–774. DOI: 10.1016/s1876-3804(21)60062-9

Received: 13 March 2023.
Reviewed: 28 March 2023.

Information about the authors

Vyacheslav V. Mukhametshin, Dr. Sc., professor, Ufa State Petroleum Technological University (Branch in the City of Oktyabrsky).

Lyubov S. Kuleshova, Cand. Sc., associate professor, deputy director for Academic Affairs, Ufa State Petroleum Technological University (Branch in the City of Oktyabrsky).

УДК 556.314.6(282.256.1)

ИЗМЕНЕНИЯ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ПРИ ЗАБОЛАЧИВАНИИ ЮГО-ВОСТОКА ЗАПАДНО-СИБИРСКОЙ РАВНИНЫ

Савичев Олег Геннадьевич,
OSavichev@mail.ru

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

Актуальность определяется необходимостью понимания механизмов взаимодействия подземных, болотных и речных вод в условиях сильной заболоченности в таежной зоне Западной Сибири для решения целого ряда научных и инженерных задач как в настоящее время, так и в перспективе.

Цель: количественная оценка изменения уровней подземных (грунтовых) вод в характерные периоды заболачивания юго-востока Западно-Сибирской равнины: 1) начало интенсивного распространения торфяных болот с мощностью торфяной залежи 0,3 м и более; 2) масштабная олиготрофизация болот.

Методы: методы математического моделирования, статистические методы.

Результаты и выводы. Проведен анализ структуры торфяной залежи в южной части водосбора реки Чая (приток реки Обь). Показано, что масштабное формирование торфяных болот (с мощностью торфа 0,3 м и более) на рассматриваемой территории происходило примерно 4 тыс. лет назад, а олиготрофизация торфяной залежи (в региональном масштабе) – примерно 2,0...1,5 тыс. лет назад. В обоих случаях основная часть болот, предположительно, могла быть отнесена к низинному типу, но, по сравнению с современным периодом, в первом случае их общая площадь была меньше в 2 раза, а во втором – больше в 1,7 раза. С учетом этих оценок определены средние значения инфильтрации Inf и коэффициентов фильтрации K_f , получена зависимость отношения Inf/K_f от площади низинных болот и выполнены расчеты уровней подземных (грунтовых) вод в настоящее время и для сроков 1,7 и 4,1 тыс. лет назад. Показано, что при олиготрофизации торфяной залежи (примерно 2,0...1,5 тыс. лет назад) с высокой вероятностью ухудшился водообмен между болотами и подземными водоносными горизонтами и выросли уровни подземных вод. Начало интенсивного регионального заболачивания (около 4 тыс. лет назад) происходило на фоне интенсивных водно-эрозионных процессов, в результате которых отмечено накопление речного аллювия, сопровождающееся подъемом уровней речных, а затем и подземных вод.

Ключевые слова:

подземные, болотные и речные воды, юго-восток Западно-Сибирской равнины, отношение инфильтрации к коэффициенту фильтрации, уровенный режим подземных вод.

Введение

Западно-Сибирская равнина характеризуется очень высокой заболоченностью, которая возрастает и в настоящее время [1–8]. По оценкам некоторых авторов [9, 10], вертикальный прирост торфяной залежи в таежной зоне составляет в среднем до 0,8 мм/год. Соответственно, можно ожидать изменения состояния остальных компонентов окружающей среды, так или иначе связанных с болотными экосистемами, в том числе и подземных вод. При этом очевидна взаимосвязь между процессами формирования режима подземных вод и болотных экосистем (далее будет использоваться термин «болотные процессы», подразумевающий комплекс взаимосвязанных событий возникновения, эволюции и деградации болот).

Этой проблемой в разное время и на примере разных регионов мира занимались многие исследователи, которым удалось получить ряд важных результатов в области гидрогеохимии, гидрогеодинамики и болотной гидрологии [11–17]. Но все же остались недостаточно раскрытыми вопросы взаимодействия подземных и болотных вод [10, 17–23]. В том числе, до сих пор не совсем понятны направленность и механизм пространственно-временных изменений фильтрационных свойств пограничных слоев болот, геомиграционных потоков и элементов водного и геохимического балансов в процессе эволюции болот, что и

определило тематику соответствующих исследований в Томском политехническом университете в последние два десятилетия [17, 22, 24]. Ниже рассмотрены результаты одного из этапов этих исследований, выполненного с целью реконструкции гидрогеологических условий в восточной части современного Васюганского болота (в географическом отношении – на юго-востоке Западно-Сибирской равнины, в левобережной части бассейна реки Оби на участке ее среднего течения, в административном отношении – в южной части Томской области) и их сопоставления с этапами болотных процессов.

Объекты и методика исследования

Общая идея исследования основана на использовании взаимосвязей между режимом подземных и поверхностных вод [25, 26] и заключается: 1) в построении кривой поверхности грунтовых вод по нормали к направлению регионального подземного стока на участках с различной степенью и характером заболоченности; 2) выявлении связей между гидрогеологическими параметрами и характеристиками болотных процессов; 3) восстановлении с помощью этих зависимостей горизонта подземных вод в верхней части гидрогеологического разреза при смене ключевых этапов болотного процесса в Западной Сибири (безнапорных и слабонапорных вод преимущественно в четвертичных отложениях либо в гидравлически свя-

занных отложениях четвертичного, неогенового и палеогенового возрастов, соответствующих по условиям залегания категории «грунтовые воды»).

С учётом этого был намечен профиль с запада-северо-запада на восток-юго-восток, пересекающий южную часть водосбора р. Чаи (левый приток р. Оби), включая ее притоки – рр. Андарма, Галка, Тетеренка, Бакчар и Икса, водосбор р. Шегарка (левый приток р. Оби), и примыкающий к р. Обь у с. Мельниково и п. Победа (рис. 1, табл. 1). В левобережной части долины р. Оби расположено низинное (по водно-минеральному питанию евтрофное) Обское болото длиной немного более 100 км и шириной до 7 км со средней толщиной торфяной залежи около 4,5 м [19, 24]. Основная часть профиля пересекает отроги Васюганского болота, точнее Васюганского болотного

комплекса, продолжающего расширяться за счет слияния отдельных верховых (по водно-минеральному питанию олиготрофных), переходных (мезотрофных) и низинных (евтрофных) болот (первый, он же основной, сценарий заболачивания предполагает формирование большого количества водоемов после деградации последнего оледенения в Сибири с последующей их евтрофизацией, образованием низинных, а затем переходных и верховых болот [2–5, 9, 10, 21]), а также «наползания» верхового болота (с окрайкой в виде низинных и переходных болот) непосредственно на залесенные суходолы (второй сценарий заболачивания; один из возможных механизмов такого «наползания» в восточной части Васюганского болота за счет разницы в проточности лесных и болотных экосистем описан в [27] на основе результатов [11, 16]).

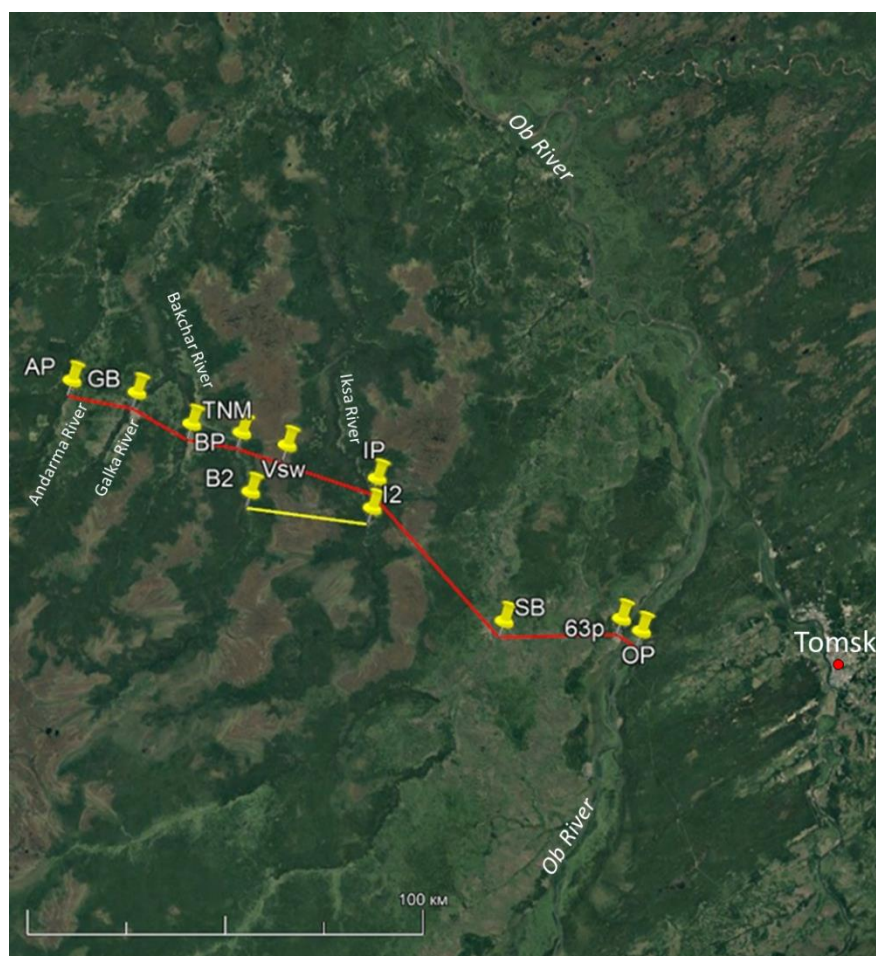


Рис. 1. Схема расположения пунктов наблюдений (табл. 1); основной расчетный профиль AP–OP проходит через посты: AP – р. Андарма у с. Панычево; GB – р. Галка у с. Бакчар; TNM – р. Тетеренка у урочища Ново-Макаровка; BP – р. Бакчар у с. Полынянка; Vsw – участок гидрогеохимических наблюдений ТПУ на Васюганском болоте; IP – р. Икса у с. Плотниково; SB – р. Шегарка у с. Боборыкино; 63p – гидрогеологическая скважина в с. Мельниково; OP – р. Обь у п. Победа; вспомогательный профиль B2–I2 (рис. 2) проходит через створы на р. Бакчар (B2) и Икса (I2); гидрогеохимические наблюдения на Обском болоте проводятся на участке 63p–OP (снимок Google Earth)

Fig. 1. Scheme of location of observation points (table 1); the main design profile AP–OP passes through the posts: AP is the Andarma river at Panychevo; GB is the Galka river at Bakchar; TNM is the Teterenka river at Novo-Makarovka; BP is the Bakchar river at Polynyanka; Vsw is site of hydrogeochemical observations of TPU in the Vasyugan bog; IP is the Iksha river at Plotnikovo; SB is the Shegarka river at Boborykino; 63p is the hydrogeological well at Melnikovo; OP is the Ob river at Pobeda; auxiliary profile B2–I2 (Fig. 2) passes through the alignments on the Bakchar (B2) and Iksha (I2) rivers; hydrogeochemical observations in the Ob swamp are carried out at the site 63p–OP (image from Google Earth)

Таблица 1. Морфометрические характеристики рек в пределах основного и дополнительного профилей (рис. 1)

Table 1. Morphometric characteristics of rivers within the main and extra profiles (Fig. 1)

№ рис. 1 Fig. 1 no.	Река/River	Пункт/Locality	Период наблюдений Observation period		L_q , км/км	F_b , км ² /км ²	f_m f_{sw} f_{e-sw} f_{m-sw} f_{o-sw}					
			от/from	до/till			%					
OP	Обь/Ob	Победа/Pobeda	1965	действ./valid	928*	264000	—	—	—	—	—	—
SB	Шегарка/Shegarka	Бабарыкино/Babarykino	1933		205	8190	25	25	11	12	2	—
IP	Икса/Iksa	Плотниково/Plotnikovo	1933		154	2560	49	63	5	35	23	—
I2		—	—		—	2360	—	—	—	—	—	—
BP	Бакчар/Bakchar	Полынянка/Polynnyanka	1974	действ./valid	144	2040	40	70	4	50	16	—
B2		—	—	—	—	1960	—	—	—	—	—	—
TNM	Тетеренка/Teterenka	Ново-Макаровка (нежилое) Novo-Makarovka (non-residential)	1965	1966	111	1470	—	56	4	36	16	—
GB	Галка/Galka	Бакчар/Bakchar	(1956) 1981	1997	119	1190	—	42	2	23	17	—
AP	Андарма/Andarma	Панычево/Panychevo	1950	действ./valid	140	2330	—	52	4	35	13	—
—	Чая/Chaya	Подгорное/Podgornoe	1933		58*	25000	35	—	—	—	—	—
—	Чузик/Chuzik	Пудино/Pudino	1978		150	7090	35	—	—	—	—	—

Примечание: номер объекта соответствует рис. 1; L_q – длина реки от истока [31]; F_b – площадь водосбора [31]; f_m – заболоченность (доля болот, выделенных по топографическим картам с учетом выделенных контуров болот, в площади водосбора) по данным [31]; по материалам дешифрирования космоснимков [32]; f_{sw} – доля болот всех типов и заболоченных земель; f_{e-sw} – доля болот низинного типа и заболоченных земель; f_{m-sw} – доля болот переходного типа; f_{o-sw} – доля болот верхового типа; прочерк означает отсутствие данных; * – длина от слияния притоков (для Оби – реки Бия и Катунь; для Чаи – реки Парбиг и Бакчар).

Note: object number corresponds to Fig. 1; L_q is the length of the river from the source [31]; F_b is the catchment area [31]; f_m is the swampiness (the proportion of swamps identified by topographic maps, taking into account the distinguished contours of swamps, in the catchment area) according to [31]; according to satellite image interpretation [32]; f_{sw} is the proportion of all types of swamps and wetlands; f_{e-sw} is the proportion of low-moor peat swamps and swampy lands; f_{m-sw} is the proportion of transition-moor peat swamps; f_{o-sw} is the proportion of high-moor peat swamps; a dash means no data; * length from the confluence of tributaries (for the Ob are the Biya and Katun rivers; for the Chaya are the Parbig and Bakchar rivers).

В первом случае (возможно, и во втором) в процессе трансформации низинного болота в переходное и верховое формируется переходный слой между минеральными грунтами и торфами, характеризующийся существенным снижением фильтрационных свойств, что может приводить к резкому снижению интенсивности массообмена между торфяной залежью и подземными водами [22]. Но в условиях низинных болот, особенно в долинах крупных рек, этот обмен в целом сохраняется [19, 24], что и определяет взаимное влияние подземных и болотных вод. Соответственно, ключевые этапы болотного процесса на рассматриваемой территории должны соответствовать: 1) началу интенсивного болотообразования, когда сформировалась торфяная залежь мощностью 0,3 м и более (согласно [28, 29], природное образование, занимающее часть земной поверхности и представляющее собой отложения торфа мощностью 0,3 м и более, насыщенное водой и покрытое специфической растительностью, рассматривается как торфяное болото, а при мощности менее 0,3 м – как заболоченные земли; практический смысл принятия мощности 0,3 м заключается и в том, что для анализа гидрогеологических условий используются данные по существенно заболоченным водосборам с явно выраженными торфяными болотами, а корректность экстраполяции полученных для современных условий зависимостей на период с нулевой заболоченностью в общем случае вызывает сильные сомнения); 2) периоду времени, когда в структуре торфяной залежи повсеместно появляются торфа переходного и верхового типов.

Для ориентировочной идентификации указанных слоев были использованы данные геологоразведоч-

ных работ на торф и научных исследований, в том числе с участием сотрудников ТПУ [1, 18, 22, 30]. Один из изученных разрезов, расположенный вблизи от основного профиля, приведен на рис. 2.

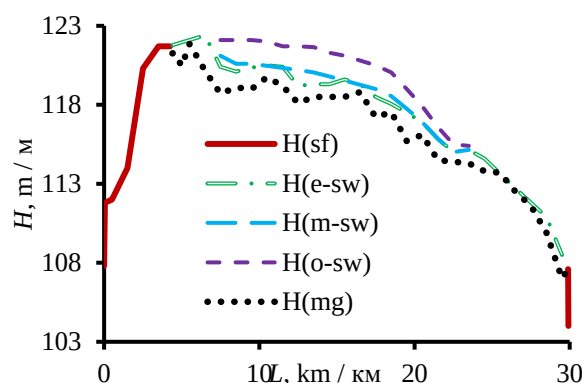


Рис. 2. Схематичный разрез Васюганского болота в междуречье рек Бакчар и Икса по профилю B2–I2 (рис. 1); высотные отметки (в метрах Балтийской системы высот) поверхности: $H(sf)$ – незаболоченных участков водосбора; $H(e-sw)$ – низинной торфяной залежи; $H(m-sw)$ – переходной торфяной залежи; $H(o-sw)$ – верховой торфяной залежи; $H(mg)$ – минеральных грунтов под болотом

Fig. 2. Schematic section of the Vasyugan swamp in the interfluvium of the Bakchar and Iksa rivers along the B2–I2 profile (Fig. 1); elevation marks (in meters of the Baltic height system) of the surface: $H(sf)$ is the non-swamped areas of the basin; $H(e-sw)$ is the low-moor peat deposit; $H(m-sw)$ is the transition-moor peat deposit; $H(o-sw)$ is the high-moor peat deposit; $H(mg)$ is the mineral ground under the swamp

Для оценки общей заболоченности водосборов использовались опубликованные данные Росгидромета [31] и материалы дешифрирования космоснимков [30, 32]. Между ними есть определенная разница, обусловленная использованием: 1) в первом случае топографических карт по состоянию на 1960-е гг. и ранее, а во втором – более современных космоснимков; 2) нескольких разных подходов к определению границ (в первом случае не учитывались болота размером до 0,5 км², пойменные болота и иные болота, не оконтуренные на топографических картах [33], во втором случае была выполнена идентификация болотной растительности по космоснимкам [32], что, предположительно, позволяет более точно учесть площадь низинных болот). С учетом указанных особенностей при анализе гидрогеологических условий использовались данные дешифрирования космоснимков.

Основной профиль проходит через ряд действующих (р. Андарма у с. Панычево, р. Бакчар у с. Полянника, р. Икса у с. Плотниково, р. Шегарка у с. Боборыкино, р. Обь у п. Победа) или закрытых в настоящее время (р. Галка у с. Бакчар, р. Тетеренка у заброшенной деревни Ново-Макаровка) гидрологических постов, а также режимную гидрогеологическую скважину 63р в с. Мельниково и пункты гидрогеохимических наблюдений на участке Васюганского болота между селами Плотниково и Полянника и на Обском болоте у сел Мельниково и Нашеково (рис. 1, табл. 1). Описание постов Росгидромета приведено в [31], участков болотных наблюдений – в [10, 22, 24, 34], скважины 63р – в [35], общая гидрогеологическая характеристика дана в [36–39], характеристика природных условий в целом и их изменений в кайнозой – в [4, 5, 40, 41]. Дополнительно в табл. 1 приведены сведения о р. Чае, к водосбору которой относятся реки Андарма, Галка, Тетеренка, Бакчар, Икса, а также о р. Чузик – одним из двух притоков р. Парабель, водосбор которой примыкает к водосбору р. Чаи на северо-западе. Ранее Ю.А. Моисеевой [42] была проведена ориентировочная реконструкция подземного стока в водосборе р. Чузик в голоцене, результаты которой также учитывались в рассматриваемом исследовании.

По материалам указанных постов были определены среднееголетние уровни и расходы воды согласно [43] с приведением к периоду с 1967 по 2005 гг. по рекам-аналогам (наиболее длинные ряды для р. Шегарки у с. Боборыкино и Иксы у с. Плотниково). Полученные значения использовались для расчета поверхности грунтовых вод при допущениях: 1) движение грунтовых вод между реками p_1 и p_2 в среднем за месячные интервалы рассматривается как условно стационарный процесс; 2) этот процесс описывается уравнением Дюпюи (1), а коэффициенты фильтрации K_f и инфильтрации Inf в каждой точке расчетного профиля близки к соответствующим средним значениям [20, 26]:

$$H_{gr,x} = \sqrt{H_{r,1}^2 - \frac{H_{r,1}^2 - H_{r,2}^2}{L_{12}} \cdot x + \frac{Inf}{K_f} \cdot (L_{12} - x) \cdot x}, \quad (1)$$

где $H_{r,1}$ и $H_{r,2}$ – уровни воды смежных рек p_1 и p_2 ; $H_{gr,x}$ – уровень подземных вод на расстоянии x от уреза реки p_1 ; L_{12} – расстояние между урезами рек p_1 и p_2 ; K_f – средний по профилю коэффициент фильтрации; Inf – средняя по профилю инфильтрация, принимаемая в среднем за многолетний период ориентировочно равной подземной составляющей речного стока, которая, в свою очередь, оценивается как среднее взвешенное из модулей годового подземного стока смежных рек M_1 и M_2 (2)–(4):

$$Inf \approx K_a \cdot \left(M_1 \cdot \frac{x}{L_{12}} + M_2 \cdot \frac{L_{12}-x}{L_{12}} \right). \quad (2)$$

$$M_j = \frac{\sum_{k=1}^{12} M_{j,k}}{12}, \quad (3)$$

$$M_{j,k} = \begin{cases} M_{j,k}, & k = 1, 2, 3, 12 \\ M_{j,3} + (M_{j,12} - M_{j,3}) \cdot \frac{k-3}{12-3}, & k > 3, k < 12 \end{cases} \quad (4)$$

где k – номер месяца календарного года; $k = 1, 2, 3, 12$ (декабрь–март) – период зимней межени, когда речной сток определяется в основном притоком подземных вод; j – номер реки; K_a – коэффициент размерности.

Тогда коэффициент фильтрации K_f может быть найден из уравнений (5), (6) по известным значениям уровней воды в смежных реках p_1 и p_2 при условии минимума функции (7):

$$K_f = \frac{Inf}{K_f} = \frac{H_1^2 - H_2^2}{(L_{12} - x) \cdot x} + \frac{H_1^2 - H_2^2}{(L_{12} - x) \cdot L_{12}}, \quad (5)$$

$$K_f = \frac{Inf}{K_f}, \quad (6)$$

$$K_r = \frac{100 \cdot |\min(H_{sf,i} - H_{gr,i}) - \Delta|}{\Delta} \rightarrow 0, \quad (7)$$

где Δ – минимальная глубина грунтовых вод в междуречье p_1 – p_2 ; i – номер расчетной точки между реками p_1 и p_2 ; $H_{sf,i}$ и $H_{gr,i}$ – высотные отметки поверхности водосбора и расчетных уровней грунтовых вод. Значения K_f и Δ определялись подбором в среде MS Excel методом общего понижающего градиента. Таким образом, расчет поверхности подземных вод выполнен для: 1) современного периода – по средним за 1967–2005 гг. данным; 2) предшествующих периодов – по зависимостям K_f (5) от характеристик заболоченности водосборов, параметры которых оценивались методом наименьших квадратов с учетом выполнения условий (8), (9) при уровне значимости 5 %:

$$\delta_r \approx \frac{1-r^2}{\sqrt{N-1}}, \quad (8)$$

$$R^2 > 0,36; \frac{|r|}{\delta_r} \geq 2; \frac{|k_r|}{\delta_k} \geq 2, \quad (9)$$

где N – объем выборки; R^2 – квадрат корреляционного отношения; r и δ_r – коэффициент корреляции и погрешность его определения; k_r и δ_k – коэффициент регрессии и погрешность его определения [43]; расчеты выполнены также в среде MS Excel.

Результаты исследования и их обсуждение

Анализ структуры вспомогательного профиля В2–I2 показал, что при максимальной глубине торфяной залежи 3,6 м и скорости ее прироста 0,8 мм/год (согласно [2, 5, 9, 10]) продолжительность болотных

процессов на рассматриваемой территории в пределах северо-восточной окраины Васюганского болотного комплекса составляет около 4,5 тыс. лет, а в его центральной части – 9...10 тыс. лет [5, 9, 10]. Если рассматривать мощность торфяной залежи 0,3 м как отметку, приуроченную к началу интенсивного распространения торфяных болот, то оно (начало интенсивного распространения торфяных болот) было приурочено примерно к сроку 4,1 тыс. лет назад. Обе временные оценки примерно соответствуют периоду сухого потепления [9, 44, 45] с атмосферным увлажнением чуть меньше современного и несколько более высокой температурой приземных слоев атмосферного воздуха [40, 42] и в целом согласуются с общей картиной эволюции Васюганского болотного комплекса [2, 3, 9, 21]. Если перенести пропорции профиля В2–I2 (рис. 2) на основной профиль (рис. 1), то в первом приближении можно принять, что примерно 3...5 тыс. лет назад на рассматриваемой территории болота были в основном низинными, а их суммарная площадь была вдвое меньше площади низинных болот в настоящее время (непосредственно для расчетов принят срок 4,1 тыс. лет назад).

Максимальная мощность слоев низинных торфов на профиле В2–I2 составляет 2,25 м, что позволяет примерно оценить время масштабного появления в структуре торфяной залежи переходных и верховых торфов: $(3,60-2,25)/0,8 \approx 1,7$ тыс. лет назад (с учетом погрешностей

определения – 1,5...2,0 тыс. лет), что, согласно [9, 10], соответствует периоду влажного потепления. При этом основную часть болот, судя по структуре торфяной залежи на профиле В2–I2, можно отнести к низинному типу с общей площадью примерно в 1,7 раза больше, чем площадь низинных болот в современный период.

Подбор параметров Inf/K_f и Δ был проведен при значениях $K_f < 2 \cdot 10^{-5}$ (7), а анализ полученных результатов показал, что, во-первых, расчетные уровни подземных вод (рис. 3) в целом соответствуют наблюдениям [35, 38, 39], в том числе в зимнюю межень 2023 г. при наибольшей близости составов речных и подземных (преимущественно грунтовых) вод (табл. 2). Во-вторых, происходит общее улучшение фильтрационных свойств грунтов по мере приближения к главной дрене – р. Оби (от 2,59 м/сут у р. Андармы до 12,66 м/сут у р. Шегарки; табл. 3). В-третьих, между величиной Inf/K_f и общей площадью низинных болот $f(e-sw)$ выявлена статистически значимая связь (по условию (9); рис. 4). При допущении сохранения этой зависимости на рассматриваемой территории в течение второй половины голоцена была выполнена оценка значений Inf/K_f по срокам 1,7 и 4,1 тыс. лет. В-четвертых, выявлен существенный подъем уровней подземных вод в междуречьях притоков р. Оби одновременно с олиготрофизацией болот в течение примерно последних 1,5...2,0 тыс. лет (рис. 3).

Таблица 2. Результаты опробования подземных и речных вод в водосборе р. Бакчар 11.03.2023 г.

Table 2. Results of testing groundwater and river waters in the catchment area of the Bakchar river, March 11, 2023

№ рис. 1 Fig. 1 no.	Объект/Object	Широта Latitude	Долгота Longi-tude	pH, ед. units of pH	Сумма главных ионов Sum of the main ions	Cl ⁻
		°			мг/дм ³ /mg/dm ³	
BP	р. Бакчар/the Bakchar river	56,999	82,339	7,50	680,4	12,2
BP(g1)	Подземные воды в с. Поротниково (глубина 5 м) Groundwater at Porotnikovo (depth 5 m)	57,007	82,353	7,69	761,9	2,6
GB	р. Галка/the Galka river	57,040	82,067	7,47	713,2	20,3
GB(g1)	Подземные воды в с. Бакчар (глубина 6 м) Groundwater at Bakchar (depth 6 m)	57,017	82,083	7,22	707,0	29,7
GB(g2)	Подземные воды в с. Бакчар (глубина 25 м) Groundwater at Bakchar (depth 25 m)	57,027	82,062	8,78	742,8	54,3

Примечание: сумма главных ионов – сумма концентраций Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^{+} , K^{+} , HCO_3^{-} , CO_3^{2-} , SO_4^{2-} , Cl^{-} ; определение химического состава вод выполнено в гидрогеохимической лаборатории ТПУ.

Note: the sum of the main ions is the sum of the concentrations of Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^{+} , K^{+} , HCO_3^{-} , CO_3^{2-} , SO_4^{2-} , Cl^{-} ; water chemical composition was determined in the hydrogeochemical laboratory of the Tomsk polytechnic university.

Таблица 3. Среднемноголетние значения месячных уровней речных вод H_r , расходов речных вод Q_c и их подземной составляющей Q_g , инфильтрации Inf , коэффициента фильтрации K_f и минимальной глубины грунтовых вод Δ в междуречье

Table 3. Average long-term values of monthly levels of river waters H_r , river water discharges Q_c and their underground component Q_g , infiltration Inf , filtration coefficient K_f and minimum groundwater depth Δ in the interfluv

№ рис. 1 Fig. 1 no.	Река/River	H_r	Δ	Q_c	Q_g	Inf	K_f
		м/м		м ³ /с/m ³ /s		м/сут/m/day	
SB	Шегарка/Shegarka	89,88±0,07	3,06	18,9±1,9	3,4±0,2	$2,57 \cdot 10^{-5}$	12,66
IP	Икса/Iksa	100,48±0,05	3,03	6,6±0,9	0,6±0,1	$5,08 \cdot 10^{-5}$	11,09
BP	Бакчар/Bakchar	96,36±0,05	2,63	4,8±0,6	0,4±0,1	$2,03 \cdot 10^{-5}$	3,33
TNM	Тетеренка/Tetyorenka	99,35±0,04	3,01	3,5±0,8	0,8±0,2	$2,23 \cdot 10^{-5}$	3,51
GB	Галка/Galka	93,21±0,03	0,62	4,3±0,9	0,5±0,1	$4,54 \cdot 10^{-5}$	3,12
AP	Андарма/Andarma	93,56±0,07	2,35	6,6±2,9	1,5±0,1	$4,29 \cdot 10^{-5}$	2,59

Примечание: рассмотрены междуречья Обь–Шегарка, Шегарка–Икса, Икса–Бакчар, Бакчар–Тетеренка, Тетеренка–Галка, Галка–Андарма; условные обозначения те же, что и в уравнениях (1)–(6).

Note: the interfluvies of the Ob–Shegarka, Shegarka–Iksa, Iksa–Bakchar, Bakchar–Teterenka, Teterenka–Galka, Galka–Andarma are considered; the conventions are the same as in equations (1)–(6).

Можно предположить, что изменение типа болот от низинного к верховому связано с ухудшением водообмена между болотом и подземными водоносными горизонтами вследствие механической и биогеохимической колюматации подстилающих болото грунтов [22]. При этом, вероятно, сократилась инфильтрация из торфяной залежи в подземные водоносные горизонты. Но, с учетом уменьшения и средних коэффициентов фильтрации, этого было достаточно, чтобы обеспечить параболический профиль поверхности подземных вод, в ряде случаев достигающей условно водоупорного слоя подстилающих болото минеральных грунтов. Причем на горизонтальных границах верхового болота возрастает вероятность выхода на поверхность подземных вод, что также способствует заболачиванию смежных суходолов (по второму сценарию).

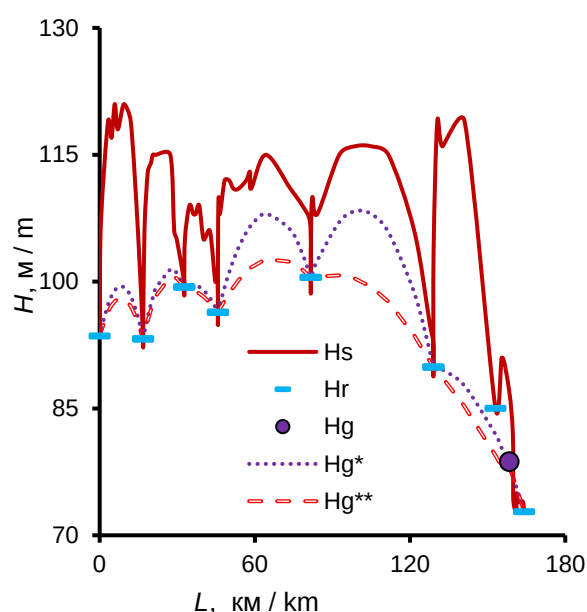


Рис. 3. Профиль АР–ОР и уровни подземных вод в настоящее время и при распространении только низинных болот: H_s – поверхность водосбора или дна рек; H_r – среднедолгосрочный уровень речных и озерных (озеро у с. Мельниково) вод; H_g – среднедолгосрочный уровень воды в скважине 63р в с. Мельниково; H_g^* – расчетный среднегодовой уровень подземных вод в среднем за 1967–2005 гг.; H_g^{**} – расчетный уровень подземных вод при условии, что все болота низинного типа, а их площадь в 1,7 раза больше, чем в настоящее время (ориентировочно 1,5...2,0 тыс. лет назад)

Fig. 3. AP–OP profile and groundwater levels at the present time and with the distribution of only low-moor peat swamps: H_s is the surface of the watershed or river bottom; H_r is the average long-term level of river and lake (lake near Melnikovo) waters; H_g is the average long-term water level in the well 63p at Melnikovo; H_g^* is the estimated average annual groundwater level on average for 1967–2005; H_g^{**} is the estimated groundwater level, provided that all swamps are of low-moor peat type, and their area is 1.7 times larger than at present (approximately 1.5...2,0 thousand years ago)

В случае расчетов на срок 4,1 тыс. лет назад при меньшей общей заболаченности, площади низинных болот и более высоких значениях Inf/K_f условия отсутствия постоянного затопления поверхности водосборов удалось достичь частично лишь при понижении отметок дна рек: Андарма – на 2,5 м; Галка – 1,0 м; Тетеренка – 0,9 м; Бакчар – 1,6 м; Икса – 10,2 м; Шегарка – 14,6 м (рис. 5). Эти значения в целом соответствуют данным о мощности аллювиальных отложений притоков р. Оби на рассматриваемой территории, составляющей от 0,5–1,0 м для малых водотоков и до 20 м и более для средних рек [4, 40, 46, 47].

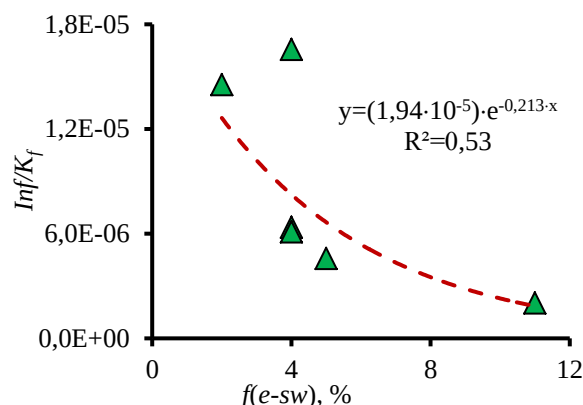


Рис. 4. Зависимость отношения инфильтрации Inf к коэффициенту фильтрации K_f от доли низинных болот $f(e-sw)$ в общей площади водосбора

Fig. 4. Dependence of the ratio of infiltration Inf to the filtration coefficient K_f on the share of low-moor peat swamps $f(e-sw)$ in the total catchment area

Более того, с учетом оценок русловых деформаций рек Томской области в настоящее время [48] можно предположить, что значительный объем таких деформаций был приурочен к раннему и среднему голоцену при сочетании повышенного водного стока, его существенной внутригодовой изменчивости, наличии многолетней (сплошной или островной) мерзлоты и минимуме растительности [4, 40, 41]. Подобные условия можно в настоящее время найти в ряде регионов мира, например, на плато Укок в верховьях бассейна р. Катунь (Горный Алтай), где наблюдаются участки интенсивной водной эрозии русел и водосборной поверхности р. Акалаха – элемента речной сети (Акалаха–Джазатор)–Аргут–Катунь–Обь. Там же имеются и заболоченные участки, в том числе с отложениями торфа более 0,3 м (в водосборе р. Аргамджи – элементе системы Аргамджи–Калгуты–Акалаха), которые при определенных обстоятельствах, видимо, могли бы сыграть роль «ядер» заболачивания. Еще один из возможных примеров развития близких по смыслу эрозивно-аккумулятивных процессов в период начального заболачивания юго-востока Западно-Сибирской равнины – территории в пределах зоны тундры и лесотундры на севере Обского бассейна [41, 49].

Таким образом, примерно от 9...10 до 3...5 тыс. лет назад на фоне сохранения многолетней мерзлоты

(сплошной или островной [21]), некоторого снижения водного стока, интенсивной водной эрозии и заболачивания водосборов гидрогеологические условия в рассматриваемой части юго-востока Западно-Сибирской равнины с высокой вероятностью были близки к условиям, наблюдаемым в настоящее время в ее арктической части и плато в Горном Алтае. Затем, примерно 3...5 тыс. лет назад, началось масштабное распространение торфяных болот (с глубиной торфяной залежи более 0,3 м) одновременно с подъемом отметок речного дна и уровней речных вод. В последующий период, начиная примерно с 2,0...1,5 тыс. лет назад, интенсивность водно-эрозионных процессов снизилась, а направленность болотных процессов сместилась в сторону увеличения доли переходных и верховых болот. При этом происходило постепенное увеличение уровней грунтовых вод на междуречьях, наблюдаемое и в настоящее время [2, 10, 35, 38, 39, 42].

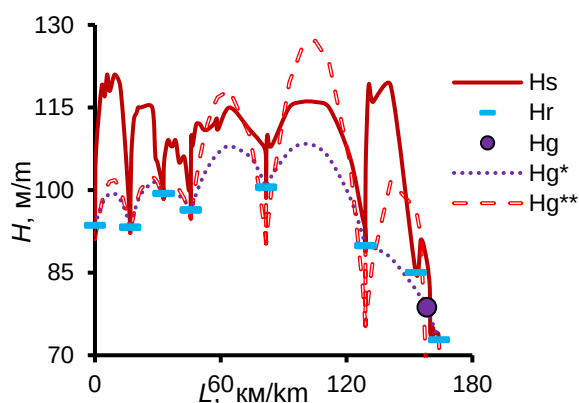


Рис. 5. Профиль АР–ОР и уровни подземных вод в настоящее время и в период начального заболачивания: H_s – поверхность водосбора или дна рек; H_r – среднелетний уровень речных и озерных (озеро у с. Мельниково) вод; H_g – среднелетний уровень воды в скважине 63р в с. Мельниково; H_g^* – расчетный среднегодовой уровень подземных вод в среднем за 1967–2005 гг.; H_g^{**} – расчетный уровень подземных вод при условии, что все болота низинного типа с глубиной не более 0,3 м, а их площадь в 2 раза меньше, чем в настоящее время (ориентировочно 4 тыс. лет назад)

Fig. 5. AP–OP profile and groundwater levels at present and during initial bogging: H_s is the surface of the watershed or river bottom; H_r is the average long-term level of river and lake (lake near Melnikovo) waters; H_g is the average long-term water level in the well 63p at Melnikovo; H_g^* is the estimated average annual groundwater level on average for 1967–2005; H_g^{**} is the estimated groundwater level, provided that all swamps are of lowland type with a depth of no more than 0,3 m, and their area is 2 times less than at present (approximately 4 thousand years ago)

В ближайшей перспективе, в случае сохранения тенденций избыточного увлажнения и некоторой стабилизации прироста температуры приземных слоев атмосферного воздуха, судя по полученным данным (рис. 3–5), можно ожидать увеличения площади вер-

ховых болот и, как следствие, дальнейшего подъема уровней подземных вод, отмеченного ранее в [35, 42]. Однако при продолжении тренда к потеплению, в соответствии с указанными в [27] закономерностями, вероятны торфяные пожары [48, 50], а при определенных условиях и деградация болот с возвратным формированием евтрофных болотных экосистем.

Заключение

Полученные оценки (особенно временные) являются приближенными и характеризуют, прежде всего, рассмотренный профиль (рис. 1) в южной части водосбора р. Чаи. Тем не менее анализ выполненных расчетов позволил сделать следующие выводы:

- 1) заболачивание данной территории является закономерным процессом, обусловленным не только избыточным увлажнением и низкими значениями коэффициентов фильтрации, но и конфигурацией речной сети, которая, в свою очередь, определяется комплексом гидроклиматических, геоморфологических и геологических процессов как на этапе первичного заболачивания, так и в предшествующие геологические периоды;
- 2) процессы заболачивания (аккумуляции органического вещества) взаимосвязаны с противоположно направленными процессами водной эрозии; минеральное вещество с поверхности водосборов поступает в речную сеть и накапливается на участках речных русел, вызывая постепенное изменение условий взаимодействия речных и подземных вод с тенденцией роста уровней последних;
- 3) по мере олиготрофизации болот и сокращения доли низинных болот уменьшается водообмен между болотами и подземными водоносными горизонтами, а уровни подземных вод возрастают и в ряде случаев могут «подпирать» подстилающие болота минеральные грунты с низкими фильтрационными свойствами; в дальнейшем условия заболачивания все сильнее определяются влиянием капиллярных явлений, что требует проведения дополнительных исследований в этой области;
- 4) указанные выше особенности должны учитываться при осуществлении хозяйственной деятельности на заболоченных территориях, особенно при проведении рекультивации верховых болот;
- 5) сильнейшая заболоченность Западно-Сибирской равнины – уникальное сочетание различных природных процессов, возникших в среднем и позднем голоцене и в ряде случаев не ослабляющихся, а, напротив, усиливающихся хозяйственной деятельностью; к этому явлению нужно подходить осторожно и взвешенно, с учетом возможности глобальных последствий дальнейшей эволюции болотных экосистем и связанных с ними речных систем и подземных водоносных горизонтов; но необходимо понимать, что изменения неизбежны независимо от характера и степени антропогенных воздействий.

Исследование выполнено за счет гранта РНФ (проект № 23-27-00039).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Карта торфяных месторождений Западной Сибири. Масштаб 1:1000000: объяснительная записка / под ред. Р.Г. Матухина. – Новосибирск: Изд-во СО РАН: Филиал «Гео», 2000. – 33 с.
2. Болотные системы Западной Сибири и их природоохранное значение / О.Л. Лисс, Л.И. Абрамова, Н.А. Аветов, Н.А. Березина, Л.И. Инишева, Т.В. Курнишкова, З.А. Слука, Т.Ю. Толпышева, Н.К. Шведчикова / под ред. В.Б. Куваева. – Тула: Гриф и К°, 2001. – 584 с.
3. Eurasian mires of the Southern Taiga Belt: modern features and response to Holocene palaeoclimate / T. Minayeva, W. Bleuten, A. Sirin, E.D. Lapshina // *Wetlands and Natural Resource Management. Ecological Studies* / Eds. J.T.A. Verhoeven, B. Beltman, R. Bobbink, D.F. Whigham. – Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2006. – V. 190. – P. 315–341.
4. Ландшафты болот Томской области / Н.С. Евсеева, А.А. Синюткина, Ю.А. Харанжевская, Е.С. Воинова, Т.В. Ромашова, В.В. Хромых, В.А. Земцов, И.Б. Сорокин, Е.Н. Гузова, Т.Н. Жилина, З.Н. Квасникова, О.В. Хромых, В.С. Хромых / под ред. Н.С. Евсеевой. – Томск: Изд-во HTJI, 2012. – 400 с.
5. Chlachula J. Climate history and early peopling of Siberia, Earth and Environmental sciences/ Ed. by Dr. Imran Ahmad Dar. – Rijeka, Croatia: InTech Europe, University Campus, 2011. – P. 495–538. URL: <http://www.intechopen.com/books/earth-and-environmental-sciences/climate-history-and-early-peopling-of-siberia> (дата обращения 15.08.2023).
6. Global wetlands: potential distribution, wetland loss, and status / S. Hu, Zh. Niu, Y. Chen, L. Li, H. Zhang // *Science of the Total Environment*. – 2017. – V. 586. – P. 319–327. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.02.001.
7. Great Vasyugan mire: how the world's largest peatland helps addressing the world's largest problems / S.N. Kirpotin, F. Tanneberger, H. Joosten, I.V. Volkov // *Ambio*. – 2021. – V. 50. – № 11. – P. 2038–2049. DOI: 10.1007/s13280-021-01520-2.
8. Holocene wildfire regimes in Western Siberia: interaction between peatland moisture conditions and the composition of plant functional types / A. Feurdean, M. Pfeiffer, G. Butiseaca, A. Niamir, A.C. Diaconu, I. Tantau, M. Galka, S.M. Hutchinson, N. Gorina, S. Tonkov, H. Zhang, S. Kirpotin // *Climate of the Past*. – 2022. – V. 18. – № 6. – P. 1255–1274. DOI: 10.5194/cp-18-1255-2022.
9. Пологова Н.Н., Лапшина Е.Д. Накопление углерода в торфяных залежах Большого Васюганского болота // Большое Васюганское болото. – Томск: ИОА СО РАН, 2002. – С. 174–186.
10. Geochemical features of peat deposits at oligotrophic bogs in the southern taiga subzone of West Siberia / E.E. Veretennikova, I.V. Kuryina, E.A. Dyukarev, E.A. Golovatskaya, S.V. Smirnov // *Geochemistry International*. – 2021. – V. 59. – № 6. – P. 618–631. DOI: 10.1134/S0016702921050098.
11. Иванов К.Е. Водообмен в болотных ландшафтах. – Л.: Гидрометеиздат, 1975. – 280 с.
12. Гидро- и инженерно-геологические условия юго-запада Западно-Сибирской равнины / отв. ред. В.М. Матусевич. – Новосибирск: Наука, Сибирское отделение, 1987. – 129 с.
13. Shotyk W. Review of the inorganic geochemistry of peats and peatland waters // *Earth-Science Reviews*. – 1988. – № 25. – P. 95–176. DOI: 10.1016/0012-8252(88)90067-0.
14. Hydrological landscape settings of base-rich fen mires and fen meadows: an overview / A.P. Grootjans, E.B. Adema, W. Bleuten, H. Joosten, M. Madaras, M. Janáková // *Applied Vegetation Science*. – 2006. – № 9. – P. 175–184.
15. Shvartsev S.L. Geochemistry of fresh Groundwater in the Main Landscape Zones of the Earth // *Geochemistry International*. – 2008. – V. 46. – № 13. – P. 1285–1398.
16. Гидрология заболоченных территорий зоны многолетней мерзлоты Западной Сибири / под ред. С.М. Новикова. – СПб: ВВМ, 2009. – 536 с.
17. Zemtov V.A., Savichev O.G. Resources, regime and quality of surface waters in the Ob River basin: history, current state and problems of research // *International Journal of Environmental Studies*. – 2015. – V. 72. – № 3. – P. 386–396. DOI: 10.1080/00207233.2015.1019299.
18. Рассказов Н.М. Основные гидрогеологические и гидрогеохимические особенности торфяных месторождений центральной части Обь-Иртышского междуречья и некоторые вопросы гидрогеохимических исследований болот / Н.М. Рассказов, П.А. Удодов, Т.Я. Емельянова, А.Д. Назаров, В.А. Шамолин // *Подземные воды Сибири и Дальнего Востока* / отв. ред. И.С. Ломоносов, Н.А. Маринов, Е.В. Пиннекер. – М.: Наука, 1971. – С. 229–232.
19. Vegetation characteristics and eco-hydrological processes in a pristine mire in the Ob River valley (Western Siberia) / A.M. Schipper, R. Zeefat, F. Tanneberger, J.P. van Zuidam, W. Hahne, S.A. Schep, S. Loos, W. Bleuten, H. Joosten, E.D. Lapshina, M.J. Wassen // *Plant Ecology*. – 2007. – V. 193. – P. 131–145. DOI: 10.1007/s11258-006-9253-x.
20. Szymkiewicz A. Modelling water flow in unsaturated porous media accounting for nonlinear permeability and material heterogeneity. – Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag 2013. – 237 p.
21. Преис Ю.И. Криогенез болотообразовательного процесса на территории Большого Васюганского болота // Большое Васюганское болото. – Томск: ИОА СО РАН, 2002. – С. 45–63.
22. Geochemical barriers in oligotrophic peat bog (Western Siberia) / O. Savichev, E. Soldatova, M. Rudmin, A. Mazurov // *Applied Geochemistry*. – 2020. – V. 113. – 104519. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2019.104519.
23. Biogeochemistry of Holocene peatlands in the baraba forest-steppe (southern West Siberia) / G.A. Leonova, A.E. Maltsev, Yu.I. Preis, L.V. Miroshnichenko // *Applied Geochemistry*. – 2020. – V. 124. – 104811. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2020.104811.
24. Савичев О.Г., Ян Х., Чжоу Д. Гидрогеодинамические и гидрогеохимические условия самоочищения вод Обского болота (Западная Сибирь) // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2022. – Т. 333. – № 4. – С. 115–125. DOI: 10.18799/24131830/2022/4/3656.
25. Kalbus E., Reinstorf F., Schirmer M. Measuring methods for groundwater – surface water interactions: a review // *Hydrology and Earth System Sciences*. – 2006. – № 10. – P. 873–887. URL: www.hydrol-earth-syst-sci.net/10/873/2006/ (дата обращения 15.08.2023).
26. Hendriks M.R. Introduction to physical hydrology. – Oxford, New York: Oxford University Press, 2010. – 331 p.
27. Савичев О.Г. Гидроэкологическое обоснование водохозяйственных решений. – Томск: Изд-во Томск. политехн. ун-та, 2021. – 167 с.
28. ГОСТ 19179-73. Гидрология суши. Термины и определения. – М.: Госстандарт СССР, 1988. – 47 с.
29. ГОСТ 21123-85. Торф. Термины и определения. Дата введения 01.07.1986 г. – М.: Изд-во стандартов, 1985. – 85 с.
30. Альбом аэрофотоснимков растительного покрова торфяных месторождений центральной части Западной Сибири. – М.: Геолотрфразведка, 1973. – 83 с.
31. Основные гидрологические характеристики. Т. 15. Алтай, Западная Сибирь и Северный Казахстан. Вып. 1. Верхняя и Средняя Обь. – Л.: Гидрометеиздат, 1979. – 488 с.
32. The phytoindication method for mapping peatlands in the taiga zone of the West-Siberian Plain / V.A. Bazanov, A.E. Berezin, O.G. Savichev, A.A. Skugarev // *International Journal of Environmental Studies*. – 2009. – V. 66. – № 4. – P. 473–484. DOI: 10.1080/00207230903303729.
33. Р 52.08.874-2018. Определение гидрографических характеристик картографическим способом. – СПб: МПР РФ, Росгидромет, ГТИ, 2018. – 178 с.
34. Sinyutkina A.A. Characterization of peat deposit using ground penetrating radar: Survey experiments and data interpretation // *IOP Conf. Series (the Institute of Physics Publishing Ltd., United Kingdom): Earth and Environmental Science*. – 2021. – V. 928. – 012011. – P. 1–9. DOI: 10.1088/1755-1315/928/1/012011.
35. Лыготин В.А., Савичев О.Г., Макушин Ю.В. Многолетние изменения среднесезонных и среднегодовых уровней и температуры подземных вод верхней гидродинамической зоны в Томской области // *Геоэкология*. – 2010. – № 1. – С. 23–29.
36. Гидрогеология СССР. Т. 16. Западно-Сибирская равнина (Тюменская, Омская, Новосибирская и Томская области) / под ред. В.А. Нуднера. – М.: Недра, 1970. – 368 с.
37. Ресурсы поверхностных и подземных вод, их использование и качество. 2020 год. Водный кадастр. – М.: МПР РФ, Росгидромет, 2021. – 153 с.
38. Состояние геологической среды (недр) территории Сибирского федерального округа в 2020 г. Информационный бюлле-

- ть, выпуск 17. – Томск: филиал «Сибирский региональный центр ГМСН», 2021. – 194 с.
39. Состояние геологической среды (недр) территории Сибирского федерального округа в 2021 г. Информационный бюллетень, выпуск 18. – Томск: филиал «Сибирский региональный центр ГМСН», 2022. – 204 с.
40. Зубаков В.А. Палеогеография Западно-Сибирской низменности в плейстоцене и позднем плиоцене. – Л.: Наука, 1972. – 200 с.
41. Малолетко А.М. Эволюция речных систем Западной Сибири в мезозое и кайнозое. – Томск: Томск. гос. у-т, 2008. – 288 с.
42. Моисеева Ю.А. Изменения подземного стока таежной зоны Западной Сибири в голоцене: автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – Томск, 2018. – 22 с.
43. СП 33-101-2003. Свод правил по проектированию и строительству. Определение основных расчетных гидрологических характеристик. – М.: Госстрой России, 2004. – 72 с.
44. Bradshaw R.H.M., Sykes M.T. Ecosystem dynamics. From the past to the future. – Chichester, West Sussex, UK: John Wiley & Sons, Ltd., 2014. – 321 p.
45. Количественная реконструкция годовых температур воздуха Алтайского региона за последние 1400 лет по данным аналитической микростратиграфии ленточных глин оз. Кучерлинское / А.В. Дарьин, Г. Чу, Ц. Сан, В.В. Бабич, И.А. Калугин, Т.И. Маркович, В.С. Новиков, М.А. Максимов, Ф.А. Дарьин, Д.С. Сороколетов, Я.В. Ракшун, А.А. Гогин, Р.А. Сенин // Известия РАН. Серия географическая. – 2021. – Т. 85. – № 1. – С. 97–108. DOI: 10.31857/S2587556621010039.
46. Создание электронной версии карты четвертичных отложений томской области масштаба 1:500000 / Ю.В. Макушин, Н.Г. Глущенко, Н.И. Глущенко, Е.К. Панаева // Геоинформатика-2000: Труды Междунаро. научно-практ. конф. – Томск, 12–14 сентября 2000. – Томск: Томск. гос. ун-т, 2000. – С. 142–144.
47. Строкова Л.А., Емельянова Т.Я. Инженерно-геологические критерии региональной оценки устойчивости геологической среды к техногенным воздействиям // Обской вестник. – 1999. – № 1–2. – С. 32–38.
48. Экзогенные геологические процессы на территории Томской области в 2000 г. Информационный бюллетень. Вып. 6. – Томск: ТЦ «Томскгеомониторинг», 2001. – 72 с.
49. Строкова Л.А., Епифанова Е.А. Оценка суффозионной опасности территории пос. Сабетта (полуостров Ямал) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 7. – С. 95–106.
50. Kharanzhevskaya Yu.A., Sinyutkina A.A. Effects of wildfire on the water chemistry of the northeastern part of the Great Vasyugan Mire (Western Siberia) // IOP Conf. Series (the Institute of Physics Publishing Ltd., United Kingdom): Earth and Environmental Science. – 2021. – V. 928. – 012006. – P. 1–8. DOI: 10.1088/1755-1315/928/1/012006

Поступила: 06.09.2023 г.

Дата рецензирования: 14.09.2023 г.

Информация об авторах

Савичев О.Г., доктор географических наук, профессор отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 556.314.6(282.256.1)

CHANGES IN HYDROGEOLOGICAL CONDITIONS DURING BOGGING IN THE SOUTHEAST OF THE WEST SIBERIAN PLAIN

Oleg G. Savichev,
OSavichev@mail.ru

National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

Relevance of the research is determined by the need to understand the mechanisms of interaction between groundwater, swamp and river waters in conditions of severe swampiness in the taiga zone of Western Siberia to solve a number of scientific and engineering problems both at present and in the future.

The aim: quantitative assessment of changes in the levels of groundwaters during the characteristic periods of swamping of the southeast of the West Siberian Plain: 1) the beginning of an intensive spread of peat swamps with a peat deposit thickness of 0,3 m or more; 2) oligotrophization of swamps.

Methods: methods of mathematical modeling, statistical methods.

Results and conclusions. The author has carried out the analysis of peat deposit structure in the southern part of the Chaya river (a tributary of the Ob river) catchment area. The large-scale formation of peat swamps (with a peat thickness of 0,3 m or more) in the area under consideration occurred approximately 4 thousand years ago; the oligotrophization of the peat deposit (on a regional scale) occurred approximately 2,0...1,5 thousand years ago. In both cases, the main part of the swamps presumably could be attributed to the lowland type, but compared with the modern period in the first case their total area was 2 times less, and in the second was 1,7 times more. Taking into account these estimates, the average values of infiltration I_{nf} and filtration coefficients K_f were determined, the ratio I_{nf}/K_f dependence on the area of low-moor peat swamps was obtained, and groundwater levels were calculated at the present time and for periods of 1,7 and 4,1 thousand years ago. During the oligotrophization of the peat deposit (approximately 2,0...1,5 thousand years ago), with a high probability, there was a deterioration in water exchange between swamps and underground aquifers and an increase in groundwater levels. The beginning of intensive regional swamping (about 4 thousand years ago) occurred against the background of intense water-erosion processes. This results in accumulation of river alluvium accompanied by a rise in the levels of river water and then groundwater.

Key words:

groundwater, swamp and river waters, southeast of the West Siberian Plain,
ratio of infiltration to filtration coefficient, groundwater level regime.

The research was carried out using the RSF grant (project no. 23-27-00039).

REFERENCES

1. Karta torfyanykh mestorozhdeniy Zapadnoy Sibiri. Masshtab 1:1000000: obyasnitel'naya zapiska [Map of peat deposits in Western Siberia. Scale 1:1000000: explanatory note]. Ed. by R.G. Matukhin. Novosibirsk, SB RAS Publ. house, Branch «Geo», 2000. 33 p.
2. Liss O.L., Abramova L.I., Avetov N.A. Bolotnye sistemy Zapadnoy Sibiri i ikh prirodookhrannoe znachenie [Bog of Western Siberia and their conservation value]. Tula, Grif i K° Publ., 2001. 584 p.
3. Minayeva T., Bleuten W., Sirin A., Lapshina E.D. Eurasian mires of the Southern Taiga Belt: modern features and response to Holocene palaeoclimate. *Wetlands and Natural Resource Management. Ecological Studies*. Eds. J.T.A. Verhoeven, B. Beltman, R. Bobbink, D.F. Whigham. Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag, 2006. Vol. 190, pp. 315–341.
4. Evseeva N.S., Sinyutkina A.A., Kharanzhevskaya Yu.A., Voistinova E.S., Romashova T.V., Khromykh V.V., Zemtsov V.A., Sorokin I.B., Guzova E.N., Zhilina T.N., Kvasnikova Z.N., Khromykh O.V., Khromykh V.S. *Landshafty bolot Tomskoy oblasti* [Landscapes of swamps of the Tomsk region]. Tomsk, NTL Publ., 2012. 400 p.
5. Chlachula J. *Climate history and early peopling of Siberia, earth and environmental sciences*. Ed. Dr. Imran Ahmad Dar. Rijeka, Croatia, InTech Europe, University Campus, 2011. pp. 495–538. Available at: <http://www.intechopen.com/books/earth-and-environmental-sciences/climate-history-and-early-peopling-of-siberia> (accessed 15 August 2023).
6. Hu S., Niu Zh., Chen Y., Li L., Zhang H. Global wetlands: potential distribution, wetland loss, and status. *Science of the Total Environment*, 2017, vol. 586, pp. 319–327. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.02.001.
7. Kirpotin S.N., Tanneberger F., Joosten H., Volkov I.V. Great Vasyugan mire: how the world's largest peatland helps addressing the world's largest problems. *Ambio*, 2021, vol. 50, no. 11, pp. 2038–2049. DOI: 10.1007/s13280-021-01520-2.
8. Feurdean A., Pfeiffer M., Butiseaca G., Niamir A., Diaconu A.C., Tantau I., Galka M., Hutchinson S.M., Gorina N., Tonkov S., Zhang H., Kirpotin S. Holocene wildfire regimes in Western Siberia: interaction between peatland moisture conditions and the composition of plant functional types. *Climate of the Past*, 2022, vol. 18, no. 6, pp. 1255–1274. DOI: 10.5194/cp-18-1255-2022.
9. Pologova N.N., Lapshina E.D. Nakoplenie ugleroda v torfyanykh zalezakh Bolshogo Vasuganskogo bolota [Carbon accumulation in peat bog deposits of the Great Vasyugan bog]. *Bolshoe Vasuganskoe boloto. Sovremennoe sostoyanie i protsessy razvitiya* [Big Vasyugan bog. Current status and development]. Tomsk, Institute of Atmospheric Optics SB RAS Publ., 2002. pp. 174–179.
10. Veretennikova E.E., Kuryina I.V., Dyukarev E.A., Golovatskaya E.A., Smirnov S.V. Geochemical features of peat deposits at oligotrophic bogs in the southern taiga subzone of West Siberia. *Geochemistry International*, 2021, vol. 59, no. 6, pp. 618–631. DOI: 10.1134/S0016702921050098.
11. Ivanov K.E. *Vodoobmen v bolotnykh landschaftakh* [Water exchange in mire landscapes]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1975. 280 p.
12. *Gidro- i inzhenerno-geologicheskie usloviya yugo-zapada Zapadno-Sibirskoy ravniny* [Hydro- and engineering-geological conditions of the south-west of the West Siberian Plain]. Ed. by V.M. Matusevich. Novosibirsk, Nauka Publ., Siberian Branch, 1987. 129 p. In Rus.
13. Shotyk W. Review of the inorganic geochemistry of peats and peatland waters. *Earth-Science Reviews*, 1988, no. 25, pp. 95–176. DOI: 10.1016/0012-8252(88)90067-0.

14. Grootjans A.P., Adema E.B., Bleuten W., Joosten H., Madaras M., Janáková M. Hydrological landscape settings of base-rich fen mires and fen meadows: an overview. *Applied Vegetation Science*, 2006, vol. 9, pp. 175–184.
15. Shvartsev S.L. Geochemistry of fresh groundwater in the main landscape zones of the Earth. *Geochemistry International*, 2008, vol. 46, no. 13, pp. 1285–1398.
16. *Gidrologiya zabolochennykh territoriy zony mnogoletney merzloty Zapadnoy Sibiri* [Hydrology of wetlands in the permafrost zone of Western Siberia]. Ed. by S.M. Novikov. St. Petersburg, VVM Publ., 2009. 536 p.
17. Zemtsov V.A., Savichev O.G. Resources, regime and quality of surface waters in the Ob River basin: history, current state and problems of research. *International Journal of Environmental Studies*, 2015, vol. 72, no. 3, pp. 386–396. DOI: 10.1080/00207233.2015.1019299.
18. Rasskazov N.M., Udodov P.A., Emelyanova T.Ya., Nazarov A.D., Shamolin V.A. Osnovnye gidrogeologicheskie i gidroekhimicheskie osobennosti torfyanykh mestorozhdeniy tsentralnoy chasti Ob-Irtyshskogo mezhdurechya i nekotorye voprosy gidroekhimicheskikh issledovaniy bolot [Main hydrogeological and hydrogeochemical features of peat deposits in the central part of the Ob-Irtysh interfluvium and some issues of hydrogeochemical studies of bogs]. *Podzemnye vody Sibiri i Dalnego Vostoka* [Ground waters of Siberia and the Far East]. Ed. by I.S. Lomonosov, N.A. Marinov, E.V. Pinneker. Moscow, Nauka Publ., 1971. pp. 229–232.
19. Schipper A.M., Zeefat R., Tanneberger F., Van Zuidam J.P., Hahne W., Schep S.A., Loos S., Bleuten W., Joosten H., Lapshina E.D., Wassen M.J. Vegetation characteristics and ecohydrological processes in a pristine mire in the Ob River valley (Western Siberia). *Plant Ecology*, 2007, vol. 193, pp. 131–145. DOI: 10.1007/s11258-006-9253-x.
20. Szymkiewicz A. *Modelling water flow in unsaturated porous media accounting for nonlinear permeability and material heterogeneity*. Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag 2013. 237 p.
21. Preis Yu.I. Kriogeneza boloto obrazovatel'nogo protsessa na territorii Bolshogo Vasyuganskogo bolota [Cryogenesis of the swamp-forming on the territory of the Great Vasyugan swamp]. *Bolshoe Vasuganskoe boloto. Sovremennoe sostoyaniye i protsessy razvitiya* [Big Vasyugan bog. Current status and development]. Tomsk, Institute of Atmospheric Optics SB RAS Publ., 2002. pp. 45–63.
22. Savichev O., Soldatov E., Rudmin M., Mazurov A. Geochemical barriers in oligotrophic peat bog (Western Siberia). *Applied Geochemistry*, 2020, vol. 113, 104519. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2019.104519.
23. Leonova G.A., Maltsev A.E., Preis Yu.I., Miroshnichenko L.V. Biogeochemistry of holocene peatlands in the baraba forest-steppe (southern West Siberia). *Applied Geochemistry*, 2021, vol. 124, 104811. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2020.104811.
24. Savichev O.G., Yang H., Zhou D. Hydrogeodynamic and hydrogeochemical conditions of self-clearance of the Obskoe fen water (Western Siberia). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, no. 4, pp. 115–125. In Rus. DOI: 10.18799/24131830/2022/4/3656.
25. Kalbus E., Reinstorff F., Schirmer M. Measuring methods for groundwater – surface water interactions: a review. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2006, vol. 10, pp. 873–887. Available at: www.hydrol-earth-syst-sci.net/10/873/2006/ (accessed 15 August 2023).
26. Hendriks M.R. *Introduction to physical hydrology*. Oxford, New York, Oxford University Press, 2010. 331 p.
27. Savichev O.G. *Gidroekologicheskoe obosnovanie vodokhozyaystvennykh resheniy* [Hydroecological substantiation of water management decisions]. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ. House, 2021. 167 p.
28. GOST 19179-73. *Gidrologiya sushi. Terminy i opredeleniya* [Land hydrology. Terms and definitions]. Moscow, Gosstandart of the USSR Publ., 1988. 47 p.
29. GOST 21123-85. *Torf. Terminy i opredeleniya* [Peat. Terms and definitions]. Moscow, Izdatel'stvo standartov, 1985. 85 p.
30. *Album aerofotosnimkov rastitelnogo pokrova torfyanykh mestorozhdeniy tsentralnoy chasti Zapadnoy Sibiri* [Album of photographs of the vegetation cover of peat deposits in the central part of Western Siberia]. Moscow, Geol'torfrazvedka Publ., 1973. 83 p.
31. *Osnovnye gidrologicheskie kharakteristiki. T. 15. Altay, Zapadnaya Sibir i Severnyy Kazakhstan. No. 1. Verkhnyaya i Srednyaya Ob* [Basic hydrological characteristics. Vol. 15. Altai, Western Siberia and Northern Kazakhstan. Iss. 1. Upper and Middle Ob]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1979. 488 p.
32. Bazanov V.A., Berezin A.E., Savichev O.G., Skugarev A.A. The phytoindication method for mapping peatlands in the taiga zone of the West-Siberian Plain. *International Journal of Environmental Studies*, 2009, vol. 66, no. 4, pp. 473–484. DOI: 10.1080/00207230903303729.
33. R 52.08.874-2018. *Opredelenie gidrograficheskikh kharakteristik kartograficheskim sposobom* [Determination of hydrographic characteristics by cartographic method]. St. Petersburg, Ministry of Natural Resources of the Russian Federation, Roshydromet Publ., 2018. 178 p.
34. Sinyutkina A.A. Characterization of peat deposit using ground penetrating radar: Survey experiments and data interpretation. *IOP Conf. Series (the Institute of Physics Publishing Ltd., United Kingdom): Earth and Environmental Science*, 2021, vol. 928, 012011, pp. 1–9. DOI: 10.1088/1755-1315/928/1/012011.
35. Lgotin V.A., Savichev O.G., Makushin Yu.V. Long-term changes in the average seasonal and average annual levels and temperature of groundwater in the upper hydrodynamic zone in the Tomsk region. *Geocology, engineering geology, hydrogeology, geocryology*, 2010, no. 1, pp. 23–29. In Rus.
36. *Gidrogeologiya SSSR. T. 16. Zapadno-Sibirskaya ravnina (Tyumenskaya, Omskaya, Novosibirskaya i Tomskaya oblasti)* [Hydrogeology of the USSR. Vol. 16. The West Siberian Plain (Tyumen, Omsk, Novosibirsk and Tomsk regions)]. Ed. by V.A. Nudner. Moscow, Nedra Publ., 1970. 368 p.
37. *Resursy poverkhnostnykh i podzemnykh vod, ikh ispolzovanie i kachestvo. 2020 god* [Water cadastre. Surface and groundwater resources, their use and quality. 2020]. St. Petersburg, Roshydromet Publ., 2021. 153 p.
38. *Sostoyaniye geologicheskoy sredy (nedr) na territorii Sibirskogo federal'nogo okruga v 2020 g. Informatsionnyy byulleten* [Condition of the geological environment (subsoil) in the territory of Siberian Federal District in 2020. Informational bulletin]. Tomsk, Filial «Sibirskiy regionalnyy tsentr GMSN», FGBU «Gidrospektogeologiya» Publ., 2021. Vol. 17, 194 p.
39. *Sostoyaniye geologicheskoy sredy (nedr) na territorii Sibirskogo federal'nogo okruga v 2021 g. Informatsionnyy byulleten* [Condition of the geological environment (subsoil) in the territory of Siberian Federal District in 2021. Informational bulletin]. Tomsk, Filial «Sibirskiy regionalnyy tsentr GMSN», FGBU «Gidrospektogeologiya» Publ., 2022. Vol. 18, 204 p.
40. Zubakov V.A. *Paleogeografiya Zapadno-Sibirskoy nizmennosti v pleystotsene i pozdneplotsene* [Paleogeography of the West Siberian Lowland in the Pleistocene and Late Pliocene]. Leningrad, Nauka Publ., 1972. 200 p.
41. Maloletko A.M. *Evolutsiya rechnykh sistem Zapadnoy Sibiri v mezozoe i kaynozoe* [Evolution of the river systems of Western Siberia in the Mesozoic and Cenozoic]. Tomsk, Tomsk State University Publ., 2008. 288 p.
42. Moiseeva Yu.A. *Izmeneniya podzemnogo stoka tayezhnoy zony Zapadnoy Sibiri v golotsene*. Dis. Kand. nauk [Changes in the underground runoff of the taiga zone of Western Siberia in the Holocene. Cand. Dis.]. Tomsk, 2018. 22 p.
43. SP 33-101-2003. *Svod pravil po proektirovaniyu i stroitel'stvu. Opredeleniye osnovnykh raschetnykh gidrologicheskikh kharakteristik* [Code of rules for design and construction. Determination of the main calculated hydrological characteristics]. Moscow, Gosstroy of Russia Publ., 2004. 72 p.
44. Bradshaw R.H.M., Sykes M.T. *Ecosystem Dynamics. From the past to the future*. Chichester, West Sussex, UK, John Wiley & Sons, Ltd., 2014. 321 p.
45. Daryin A.V., Chu G., San C., Babich V.V., Kalugin I.A., Markovich T.I., Novikov V.S., Maksimov M.A., Daryin F.A., Sorokolev D.S., Rakshun Ya.V., Gogin A.A., Senin R.A. Quantitative reconstruction of the Altai region annual air temperatures over the past 1400 years according to analytical microstratigraphy of Lake Kucherla varved clays. *Izvestiya RAN. Seriya geograficheskaya*, 2021, vol. 85, no. 1, pp. 97–108. In Rus. DOI: 10.31857/S2587556621010039.

46. Makushin Yu.V., Glushchenko N.G., Glushchenko N.I., Panaeva E.K. Sozdanie elektronnoy versii karty chetvertichnykh otlozheniy tomskoy oblasti masshtaba 1:500000 [Creation of an electronic version of the map of Quaternary deposits of the Tomsk region at a scale of 1:500000]. *Geoinformatika-2000. Trudy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Geoinformatics-2000. Proceedings of the International scientific and practical conference]. Tomsk, September 12–14, 2000. Tomsk, Tomsk State University Publ., 2000. pp. 142–144.
47. Strokova L.A., Emelyanova T.Ya. Inzhenerno-geologicheskie kriterii regionalnoy otsenki ustoychivosti geologicheskoy sredy k tekhnogennym vozdystviyam [Engineering-geological criteria for regional assessment of the stability of the geological environment to technogenic impacts]. *Obskoy vestnik*, 1999, no. 1–2, pp. 32–38.
48. Ekzogennyye geologicheskie protsessy na territorii Tomskoy oblasti v 2000 godu [Exogenous geological processes on the territory of the Tomsk region in 2000]. *Informatsionny byulleten* [Information bulletin]. Tomsk, TC Tomskgeomonitoring Publ., 2001. Iss. 6, 72 p.
49. Strokova L.A. Assessment of suffosion in the territory of settlement Sabetta, the Yamal peninsula. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 7, pp. 95–106. In Rus.
50. Kharanzhevskaya Yu.A., Sinyutkina A.A. Effects of wildfire on the water chemistry of the northeastern part of the Great Vasyugan Mire (Western Siberia). *IOP Conf. Series (the Institute of Physics Publishing Ltd., United Kingdom): Earth and Environmental Science*, 2021, vol. 928, 012006, pp. 1–8. DOI: 10.1088/1755-1315/928/1/012006.

Received: 6 September 2023.
Reviewed: 14 September 2023.

Information about the authors

Oleg G. Savichev, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 534.22

НАСТРОЙКА РЕЗОНАНСНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ИЗЛУЧАТЕЛЯ ПРИ ОДНОСТОРОННЕМ ДОСТУПЕ К ОБЪЕКТУ

Азин Антон Владимирович¹,
antonazin@mail.ru

Богданов Евгений Петрович²,
ber@tpu.ru

Васильев Александр Викторович¹,
alphatomsk@yandex.ru

Пономарев Сергей Александрович¹,
doc.sergeyponomarev@gmail.com

Пономарев Сергей Васильевич¹,
psv@niipmm.tsu.ru

Рикконен Сергей Владимирович¹,
s.rikkonen@yandex.ru

¹ Национальный исследовательский Томский государственный университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36.

² Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

Актуальность. Для подготовки высоковязкой нефти к транспорту в практике используется ряд методов: термический, химический и метод физических воздействий. Ультразвуковое воздействие на углеводородное сырье является одним из физических методов. Необходима разработка эффективной методики настройки ультразвукового излучателя для максимальной передачи энергии в многослойную технологическую среду.

Цель: изучение резонансных режимов работы ультразвукового излучателя в многослойной системе при одностороннем доступе к объекту с упрощением конструкции ультразвукового излучателя резонансного типа.

Объекты: колебательная система ультразвукового излучателя резонансного типа, многослойная система, физическая модель системы «ультразвуковой излучатель – многослойная система».

Методы: математическое моделирование линейной колебательной системы с целью определения влияния свойств колебательной системы и технологических факторов на форму колебаний виброускорения и на амплитудно-частотные характеристики системы; экспериментальные исследования на основе физической модели системы «ультразвуковой излучатель – многослойная система».

Результаты. Выявлена физическая особенность работы колебательной системы, состоящая в том, что на резонансе форма колебаний сигналов силы многослойного пьезоактюатора и сигналов виброускорения имеют чисто гармонический характер. Этот эффект распространяется на работу ультразвукового излучателя резонансного типа в режиме короткого замыкания на многослойную систему. Проведены экспериментальные исследования работы ультразвукового излучателя резонансного типа в режиме короткого замыкания и при нагрузке в виде одного и двух слоев полиметилметакрилата. Получено, что амплитудно-частотная характеристика силы многослойного пьезоактюатора и виброускорения подобны друг другу. На основе анализа теоретических и экспериментальных данных разработана методика настройки резонансных режимов работы ультразвукового излучателя при одностороннем доступе к объекту, которая позволяет упростить и удешевить конструкцию излучателя. Методика настройки колебательных систем применима для лабораторных и промышленных установок.

Выводы. Анализ результатов проведенных исследований показал, что на практике в качестве критериев при определении и настройке резонанса колебательной системы можно использовать гармоническую форму сигналов ускорения и силы, а также амплитуду силы многослойного пьезоактюатора. Колебательную систему ультразвукового излучателя резонансного типа можно настраивать на резонанс по форме и амплитуде сигнала датчика силы многослойного пьезоактюатора, причем датчик силы расположен последовательно с многослойным пьезоактюатором и не требует дополнительных конструктивных элементов для его крепления. Конструкция ультразвукового излучателя значительно упрощается из-за отсутствия датчика виброускорения. Методика настройки в резонанс колебательной системы с использованием только датчика силы распространяется и при работе ультразвукового излучателя резонансного типа на многослойную механическую систему. Разработанную конструкцию и методику настройки колебательной системы ультразвукового излучателя резонансного типа удобно использовать при воздействии на технологические жидкости через стенки резервуаров и емкостей хранения.

Ключевые слова:

Ультразвуковой излучатель, энергия излучения, резонанс, датчик силы, датчик ускорения, частотные характеристики, многослойная система.

Введение

Особенность надмолекулярной структуры углеводородных жидкостей вызывает ряд проблем, возникающих в процессе добычи, перекачки и переработки данного сырья [1]. Для указанных технологических процессов это выражается в изменении реологических свойств: высокой вязкости, высокой (положительной) температуре застывания и отложения парафина на оборудовании и трубопроводе. Для подготовки высоковязкой нефти к транспорту в практике используется ряд методов: термический, химический и метод физических воздействий. На сегодняшний день физические методы находят все более широкое применение в нефтяной промышленности из-за их эффективности, экономичности и доступности [2–5]. Ультразвуковое воздействие на углеводородное сырье является одним из физических методов. В работах [1–12] показано влияние ультразвука на реологические свойства углеводородной среды.

Ультразвуковое излучение, проникая через стенки разнообразных конструкций емкостей хранения технологических жидкостей, может совершать механическую работу над средой (сварку, полимеризацию, плавление, изменение реологических свойств углеводородных сред: вязкости, температуры кипения, температуры застывания, времени тиксотропии) в определенном (замкнутом) пространстве на расстоянии от излучателя [1–5, 10–12].

Максимальная энергия, поглощаемая в среде, образуется на резонансе, режиме работы, при котором частота возбуждения совпадает с собственной частотой колебательной системы (КС). Самый распространенный на практике метод настройки в резонанс производится по максимальному сигналу акселерометра. На практике часто необходимо настраивать КС при одностороннем доступе к объекту, так как расположение датчиков ускорения (акселерометров) в агрессивной среде вызывает определенные трудности. Расположение датчика ускорения в конструкции ультразвукового (УЗ) излучателя усложняет и удорожает его изготовление. При этом датчик ускорения должен находиться на оси симметрии конструкции УЗ излучателя. Технологические неточности производства и настройки генерируют высшие гармоники колебаний, искажающие работу КС.

Целью работы является изучение резонансных режимов работы УЗ излучателя в многослойной системе при одностороннем доступе к объекту.

Моделью идеальной КС в теории колебаний является динамическая система, схема которой приведена на рис. 1. В зависимости от характера идеализации колебательной системы ей могут соответствовать различные динамические модели. Самая простая механическая колебательная система – это груз, подвешенный на пружине [13].

Можно ожидать, что при идеальной линейной КС с гармонической силой возбуждения форма выходных сигналов датчиков силы и ускорения будет синусоидальной. Для конкретной КС на практике настройка резонансного режима работы (по первой моде) возможна по двум параметрам:

- максимальной амплитуде колебания (наличие акселерометра, датчика виброскорости, датчика вибросмещения);
- нулевой (или близкой к 0) фазе между силой возбуждения и виброскоростью (необходимо наличие датчика виброскорости и датчика силы).

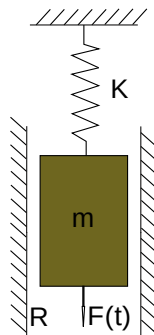


Рис. 1. Простейшая динамическая модель линейной колебательной системы: m – масса груза, кг; K – жесткость пружины (упругий подвес), Н/м; R – коэффициент неупругого сопротивления, кг/с

Fig. 1. Simplest dynamic model of a linear oscillating system: m – load weight, kg; K – spring stiffness (elastic suspension), N/m; R – inelastic resistance coefficient, kg/s

Критерий настройки резонансного режима работы УЗ излучателя резонансного типа по фазо-частотной характеристике (ФЧХ) (по нулевой фазе) возможен при малых значениях диссипации системы.

В отличие от идеальной линейной КС, представленной на рис. 1, УЗ излучатель резонансного типа будет иметь несколько другие амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) и ФЧХ, по сравнению с КС, представленной на рис. 2.

На рис. 3 представлен УЗ излучатель резонансного типа, который выполнен на основе многослойного пьезоактюатора АПМ-2-7 и состоит из: 1 – корпус излучателя; 2 и 6 – центраторы; 3 – многослойный пьезоактюатор АПМ-2-7; 4 – толкатель; 5 – упругость; 7 – датчик силы; 8 – смотровые окна в корпусе излучателя; 9 – стальная щека; 10 – гайка предварительного поджатия; 11 – стопорная гайка.

Конструкция УЗ излучателя резонансного типа является сложной колебательной системой, состоящей из отдельных масс и упругостей, то есть представляет собой сочетание нескольких колебательных подсистем.

УЗ излучатель резонансного типа состоит из следующих колебательных подсистем:

- подсистема «толкатель–упругость»;
- подсистема «корпус – упругость корпуса»;
- подсистема многослойного пьезоактюатора.

Все эти подсистемы имеют свои резонансы и могут вносить существенный вклад в АЧХ УЗ излучателя резонансного типа и в форму результирующих колебаний.

Кроме того, на результирующую АЧХ УЗ излучателя резонансного типа влияют технологические особенности: допуски при изготовлении элементов конструкции и неточности сборки [7–10].

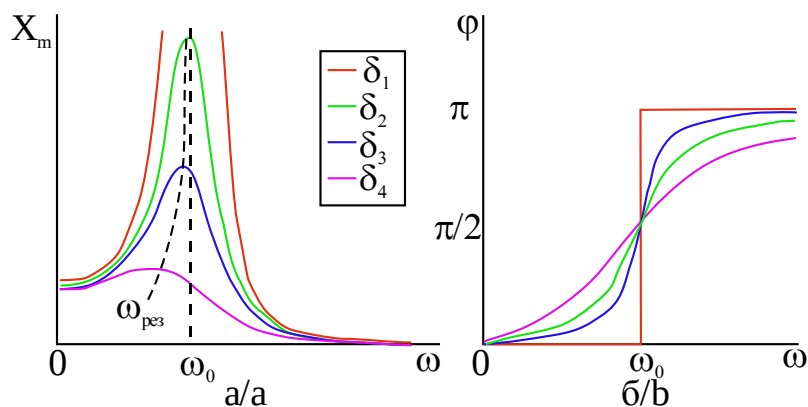


Рис. 2. АЧХ и ФЧХ линейной (идеальной) КС при разных коэффициентах диссипации (при разных потерях): ω_0 – собственная угловая частота КС; $\omega_{рез}$ – резонансная угловая частота КС; X_m – амплитуда виброскорости КС; φ – фаза между силой и виброскоростью. Сила возбуждения имеет синусоидальный характер. Коэффициент затухания КС: $\delta_4 > \delta_3 > \delta_2 > \delta_1$ [13]

Fig. 2. Amplitude frequency and Phase-Frequency characteristics of linear (ideal) oscillation system at different dissipation coefficients (at different losses): ω_0 – own angular frequency of the oscillating system; $\omega_{рез}$ – resonance angular frequency of the oscillating system; X_m – amplitude of the oscillating system vibration acceleration; φ – phase between force and vibration acceleration. The excitation force is pure sinusoidal. Attenuation factor of oscillation system: $\delta_4 > \delta_3 > \delta_2 > \delta_1$ [13]

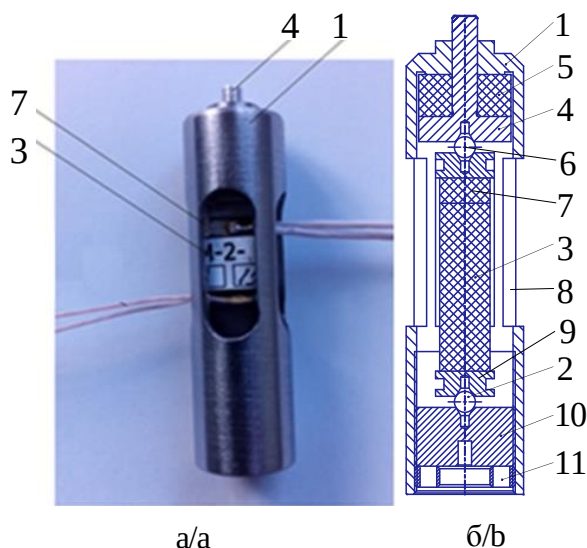


Рис. 3. Ультразвуковой излучатель резонансного типа: а) вариант изготовления; б) структурная схема

Fig. 3. Ultrasonic resonant emitter: a) manufacturing variant; b) structural design

В установившемся режиме работы идеальной КС при синусоидальной силе возбуждения по всей АЧХ форма колебаний подвижных частей КС будет иметь синусоидальный характер. Это обстоятельство служит предпосылкой для проведения расчетов с использованием метода комплексных амплитуд (символический метод расчета КС).

В переходном режиме работы идеальной КС даже действие гармонической силы на КС не гарантирует гармонический отклик механической КС в виде вибро смещения, виброскорости, виброускорения, так как во время переходного процесса одновременно присутствуют и собственные частоты КС, и частоты вынужденных колебаний. Только при совпадении этих частот наступает основной резонанс КС [2–4, 7–10, 13, 14].

При гармоническом воздействии на линейную КС при пуске возникают сложные колебания, состоящие из двух частей: колебания с частотой возмущения f_b и колебания с частотой собственных колебаний $f_{соб}$. Первые колебания называют вынужденными, вторые – свободными (рис. 4). В данном случае игнорируются неупругие сопротивления [13].

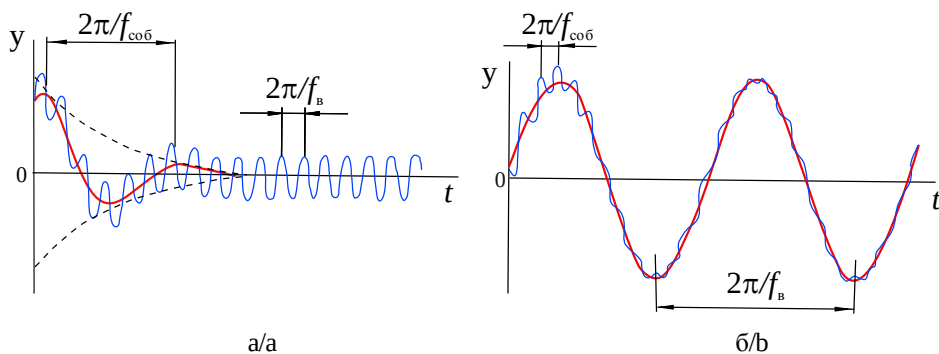


Рис. 4. Процесс сложения двух колебаний с различными частотами: а) $f_b > f_{соб}$; б) $f_b < f_{соб}$ [13]

Fig. 4. Adding two oscillations with different frequencies: a) $f_b > f_{соб}$; б) $f_b < f_{соб}$ [13]

Эта картина справедлива для идеальной линейной КС, после затухания переходного процесса система работает в устойчивом режиме. Однако при наличии паразитных гармоник силы возбуждения переходного процесса не затухают, и КС находится в постоянном квази-переходном режиме работы, который искажает АЧХ. Наличие ряда колебательных подсистем УЗ излучателя и технологических неточностей (некачественная сборка) позволяет считать, что даже при гармоническом напряжении питания многослойного пьезоактюатора в установившемся режиме колебания подвижных элементов конструкции УЗ излучателя будут негармоническими.

Поведение КС при несинусоидальном возбуждении (наличие колебательных подсистем, технологических неточностей производства и сборки) можно проиллюстрировать при периодическом импульсном воздействии (рис. 5). При совпадении частот или их кратности ($f_{\text{соб}} = n \cdot f_{\text{в}}$, $n = 1/4, 1/2, 1$) возникает резонанс [1, 5, 7–17].

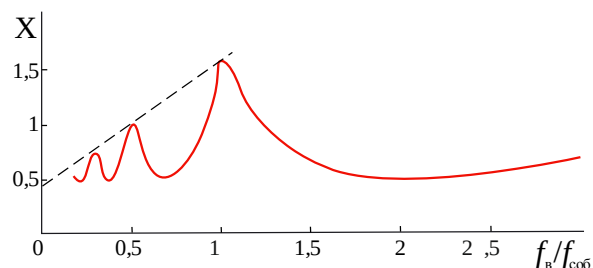


Рис. 5. АЧХ КС с учетом потерь при периодическом импульсном воздействии [13]

Fig. 5. Amplitude frequency characteristic of the oscillating system taking into account losses at periodic pulse action [13]

Математическое моделирование

При несинусоидальных формах возмущающих воздействий каждая кратная гармоника будет иметь свой пик амплитуды в частотной характеристике, убывающей по линейному закону (рис. 5) [13]. Наличие подобной АЧХ УЗ излучателя резонансного типа можно проиллюстрировать моделированием линейной КС при периодическом импульсном воздействии (типа меандр, рис. 6, б), используя математическую модель распространения ультразвукового излучения в многослойной системе [7].

Моделирование работы линейной акустической системы УЗ излучателя проводилось численным методом в пакете прикладных программ Mathcad [7–10].

Математическая модель распространения ультразвукового излучения в многослойной системе позволяет показать формы колебаний КС при разных частотах. Анализ результатов моделирования показал, что квазигармонические колебания КС появляются только в районе резонансных частот, чистая синусоида вибро-смещения появляется только на резонансе (рис. 6). На резонансе гармонические колебания КС УЗ излучателя резонансного типа показывают, что конструкция колебательной системы работает как «единое целое», то есть все подвижные элементы конструкции движутся в одной фазе. Поведение КС при несинусоидальном возбуждении (наличие подсистем, технологических неточностей) на резонансе очень похоже на поведение линейной КС с гармоническим возбуждением – система «фильтрует» высокие частоты, оставляя первую гармонику. При периодическом импульсном воздействии на АЧХ проявляются дополнительные максимумы амплитуд, что соответствует [13].

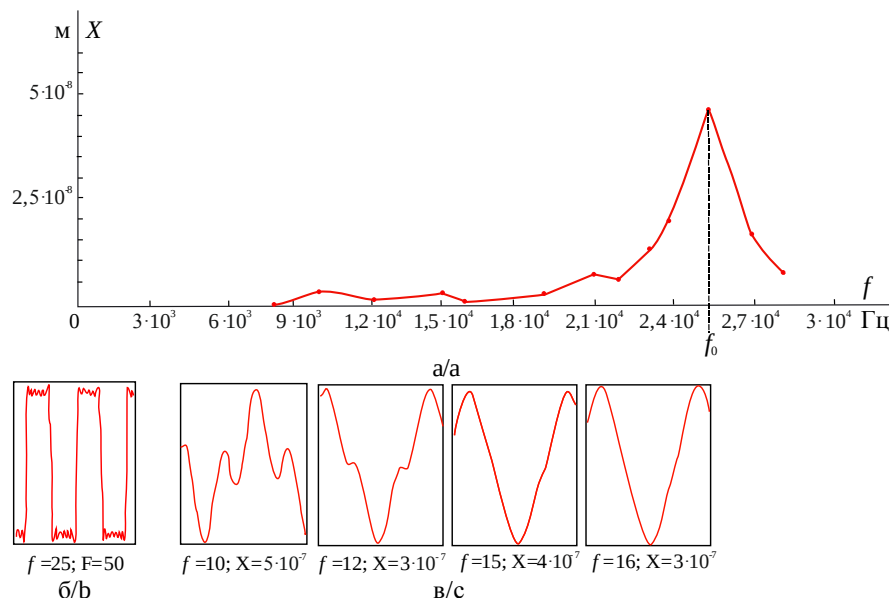


Рис. 6. Результаты моделирования КС УЗ излучателя резонансного типа: а) АЧХ КС установившегося режима при периодическом импульсном воздействии (типа меандр); б) график периодического импульсного воздействия: f в кГц, F в Н; в) формы временных зависимостей вибро-смещения при разных частотах воздействия (в соответствии с АЧХ): f в кГц, X в м

Fig. 6. Results of modelling ultrasonic resonance type emitter oscillating system: а) amplitude frequency of the fixed-mode oscillation system at periodic pulse (meander type); б) periodic impulse schedule: f in kHz, F in N; в) forms of temporal vibration dependencies at different exposure frequencies (according to amplitude frequency characteristic): f in kHz, X in m

Экспериментальные исследования

Акустическая энергия УЗ излучателя должна производить определенную работу при воздействии на разнообразные технологические жидкости – углеводородное топливо, нефть, водонефтяные эмульсии, буровой раствор, цементный раствор, полимерные жидкости. Технологические жидкости и топлива хранятся в резервуарах или в топливных баках, через стенку которых акустическая энергия должна пройти и воздействовать на технологическую жидкость [1, 7–10, 13, 17–21]. Максимальная энергия в рабочей среде будет на резонансе КС. Но настройка КС на резонанс в данном случае затруднена при расположении датчика ускорения в рабочей (агрессивной) среде.

Сопоставление АЧХ сигнала силы и АЧХ сигнала виброускорения при работе на многослойную систему в одном эксперименте позволит синтезировать

способ настройки в резонанс КС с односторонним доступом к объекту [1, 5–12, 14–18].

Экспериментальные исследования целесообразно начать со снятия АЧХ силы и ускорения при работе КС УЗ излучателя резонансного типа в режиме короткого замыкания (КЗ) (без нагрузки, при максимальных значениях ускорения).

На рис. 7, а показана схема проведения эксперимента. Сигналы с акселерометра AP10 обрабатывались на предварительном усилителе ZET 440 фирмы ZETLAB. Датчик силы представляет собой предварительно прокалиброванный пьезоактюатор (50 слоев).

На осциллографе GDS-72104E фирмы GW Instek снимаются сигналы: U – напряжения на многослойном пьезоактюаторе; F – пропорциональной силы многослойного пьезоактюатора; I – ток многослойного пьезоактюатора; $\ddot{X}$ – ускорение толкателя. На рис. 7, б приведена осциллограмма процесса на частоте 20 кГц.

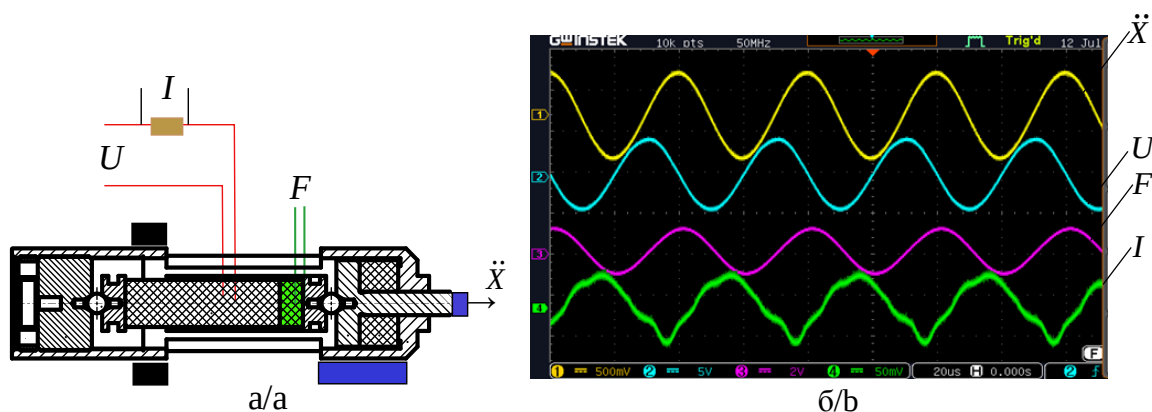


Рис. 7. Эксперимент: а) схема снятия экспериментальной АЧХ УЗ излучателя при работе на холостом ходу; б) осциллограммы сигналов измерительной системы

Fig. 7. Experiment: a) experimental amplitude-frequency characteristics ultrasonic emitter while idling; b) signal oscillograms of the measuring system

На рис. 8 представлены АЧХ силы многослойного пьезоактюатора и АЧХ ускорения УЗ излучателя резонансного типа. Сигнал ускорения получен с акселерометра, расположенного на торце толкателя. На осциллограммах данного рисунка показаны сигналы напряжения питания, ускорения толкателя и силы многослойного пьезоактюатора. Заштрихованная часть АЧХ ускорения показывает наличие гармонических колебаний этих трех сигналов на частотах, близких к резонансу, $f_p=25,5$ кГц. Вторая часть АЧХ, имеющая гармонические колебания этих трех сигналов, расположена на частотах близких к 22 кГц, но амплитуда ускорения значительно ниже, чем на основном резонансе, и не представляет интереса (рис. 8).

Наличие гармонических сигналов на резонансе позволяет использовать формулы определения полной механической мощности КС в представлении ее как линейной системы.

Полная механическая мощность КС на резонансе S определяется из формулы:

$$S = \frac{F_m \cdot \dot{X}_m}{2} = \frac{F_m \cdot \ddot{X}_m}{4\pi f}.$$

АЧХ полной механической мощности показывает, что мощность имеет максимум на частоте 25,5 кГц и это соответствует резонансному режиму по ускорению $\ddot{X}$ и по силе многослойного пьезоактюатора F_m (рис. 9).

Из данного эксперимента видно, что настройка на резонансный режим КС УЗ излучателя резонансного типа вполне возможна только по датчику силы, который расположен последовательно с многослойным пьезоактюатором и не требует дополнительных конструктивных элементов для фиксации в корпусе УЗ излучателя резонансного типа.

Далее представлены результаты исследования работы УЗ излучателя резонансного типа с нагрузкой в виде одного слоя полиметилметакрилата (ПММА) толщиной $d=1$ мм.

Наличие в конструкции УЗ излучателя резонансного типа датчика силы многослойного пьезоактюатора и акселерометра на обратной стороне слоя ПММА позволяет получить АЧХ силы и ускорения и сравнить их на предмет совпадения максимальных амплитуд сигналов для определения функционального дублирования датчика ускорения на датчик силы при настройке КС на резонанс (рис. 10).

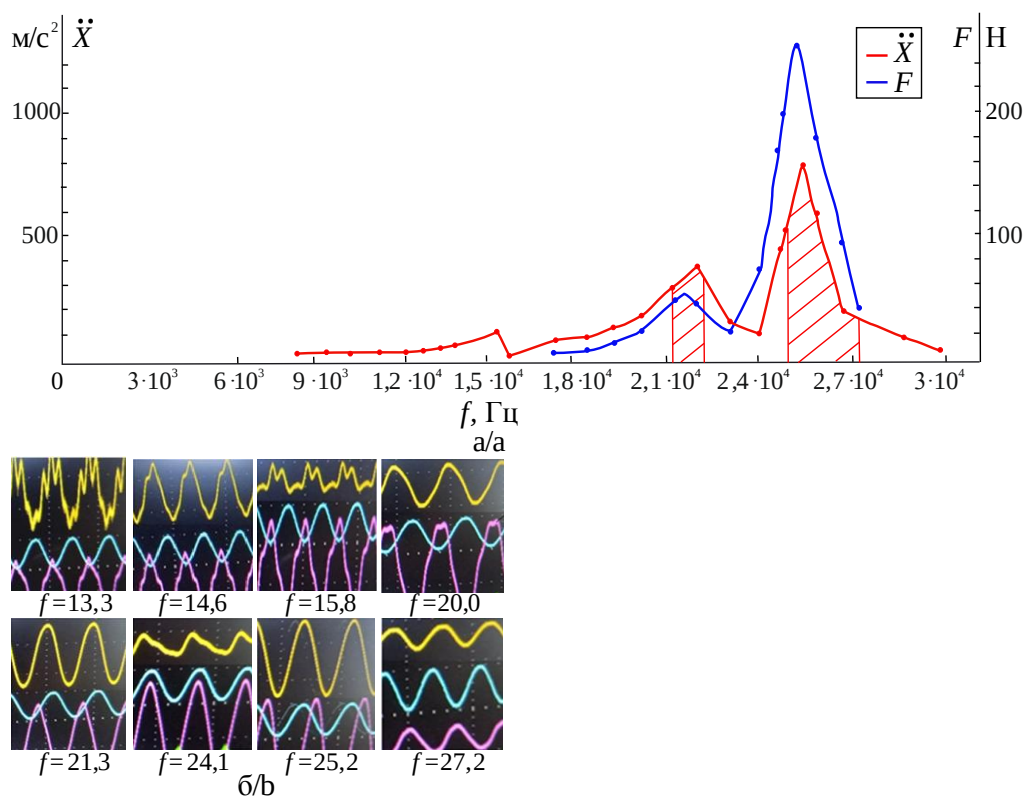


Рис. 8. Результаты экспериментальных исследований работы УЗ излучателя резонансного типа в режиме КЗ: а) АЧХ сигналов силы многослойного пьезоактюатора и ускорения УЗ излучателя резонансного типа; б) формы временных зависимостей сигналов напряжения, силы и ускорения при разных частотах воздействия (в соответствии с АЧХ), в кГц

Fig. 8. Results of experimental studies of the ultrasonic resonance type emitter operation in the short-circuit mode: a) amplitude frequency of the force of the multilayer PZT-stack and ultrasonic resonance emitter acceleration; b) forms of temporal relationships of voltage, force and acceleration at different frequencies of action (according to the amplitude frequency characteristic), in kHz

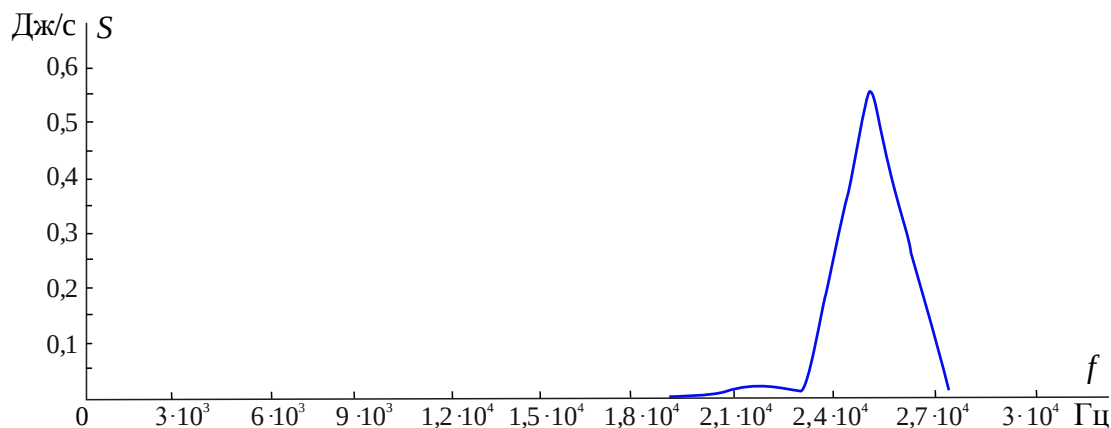


Рис. 9. АЧХ полной мощности УЗ излучателя резонансного типа в режиме КЗ

Fig. 9. Amplitude frequency characteristic of the full power of the ultrasonic resonance type emitter in the short-circuit mode

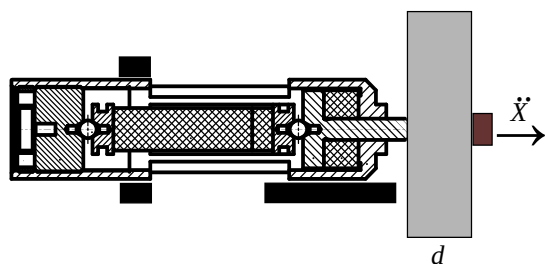


Рис. 10. Схема эксперимента по определению АЧХ УЗ излучателя резонансного типа на стенку из ПММА толщиной $d = 1$ мм

Fig. 10. Experimental scheme for determining the amplitude frequency characteristic of a resonance-type radiator on a wall made of a 1 mm thick polymethyl methacrylate

Данный эксперимент показывает возможность настройки КС на резонансную частоту по сигналу датчика силы. Сигналы силы пьезоактюатора и ускорения качественно похожи по всей АЧХ и имеют максималь-

ное значение амплитуды на одной частоте. Самые гармонические сигналы силы и ускорения наблюдаются в районе резонансной частоты, что позволяет более точно настроить КС на резонанс (рис. 11).

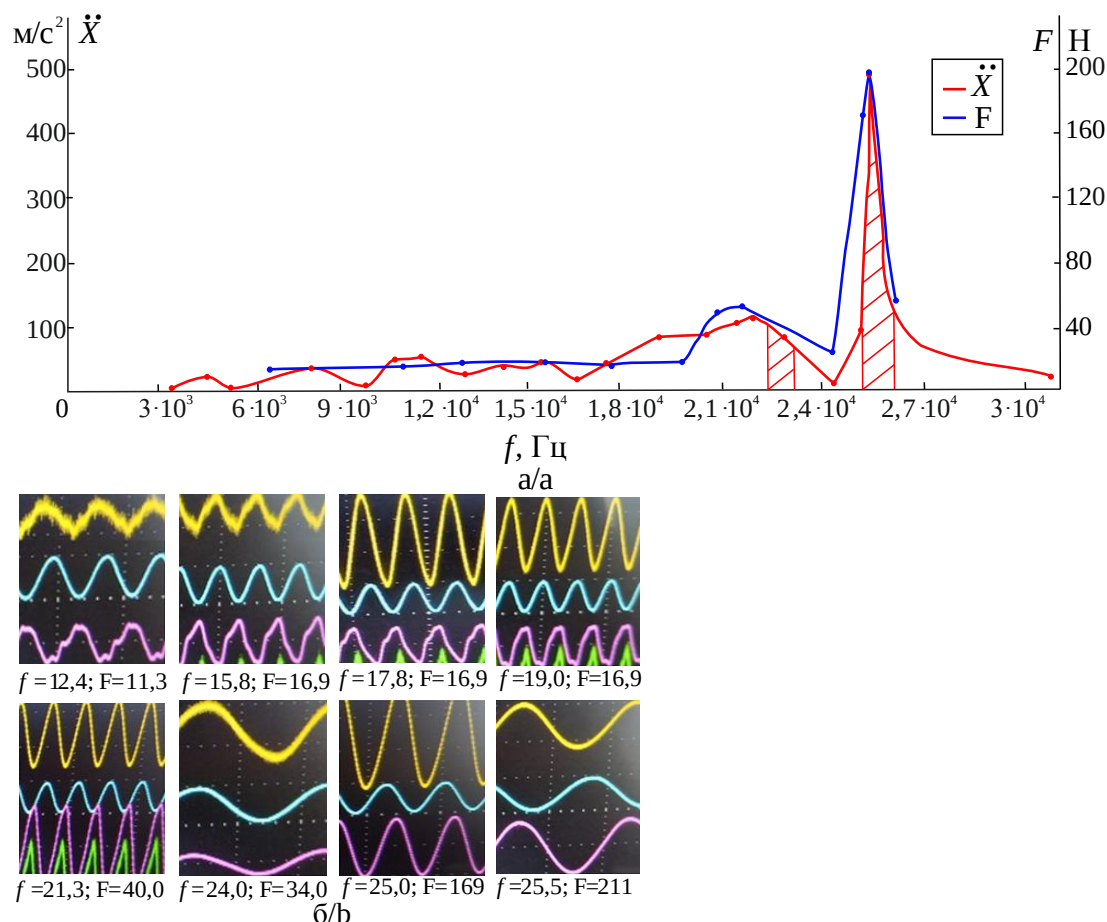


Рис. 11. Результаты экспериментальных исследований работы УЗ излучателя резонансного типа с нагрузкой в виде одного слоя ПММА: а) АЧХ сигнала силы многослойного пьезоактюатора и сигнала ускорения УЗ излучателя резонансного типа; б) формы временных зависимостей сигналов напряжения, силы и ускорения при разных частотах воздействия (в соответствии с АЧХ): f в кГц, F в Н

Fig. 11. Results of experimental studies of a single-layer polymethyl methacrylate resonance type ultrasonic emitter: а) amplitude frequency characteristics of force and acceleration of multilayer PZT-stack of ultrasonic resonance emitter; б) forms of temporal relationships of voltage, force and acceleration at different impact frequencies (according to amplitude frequency characteristic): f in kHz, F in N

Далее представлены результаты исследования работы УЗ излучателя резонансного типа с нагрузкой в виде двух слоев ПММА с толщиной слоя $d=1$ мм каждый. Схема эксперимента приведена на рис. 12.

Данный эксперимент показывает возможность настройки КС на резонансную частоту по сигналу датчика силы. Сигналы силы пьезоактюатора и ускорения качественно похожи по всей АЧХ и имеют максимальное значение амплитуды на близких частотах. Самые гармонические сигналы силы и ускорения наблюдаются в районе резонансной частоты, что позволяет более точно настроить КС на резонанс (рис. 13). В данной работе гармонический состав сигналов ускорения и силы оценивался по математическому сравнению с кривой напряжения питания УЗ излучателя, которое является синусоидальным. Ошибка при таком сравнении не превышает 15 %.

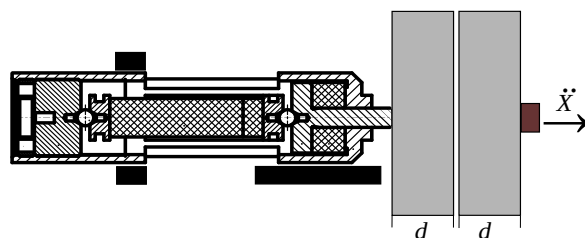


Рис. 12. Схема эксперимента по определению АЧХ УЗ излучателя резонансного типа стенку из двух слоев ПММА толщиной 1 мм

Fig. 12. Experimental scheme for determining the amplitude frequency characteristic of a resonance-type radiator wall consisting of two 1 mm thick layers of polymethyl methacrylate

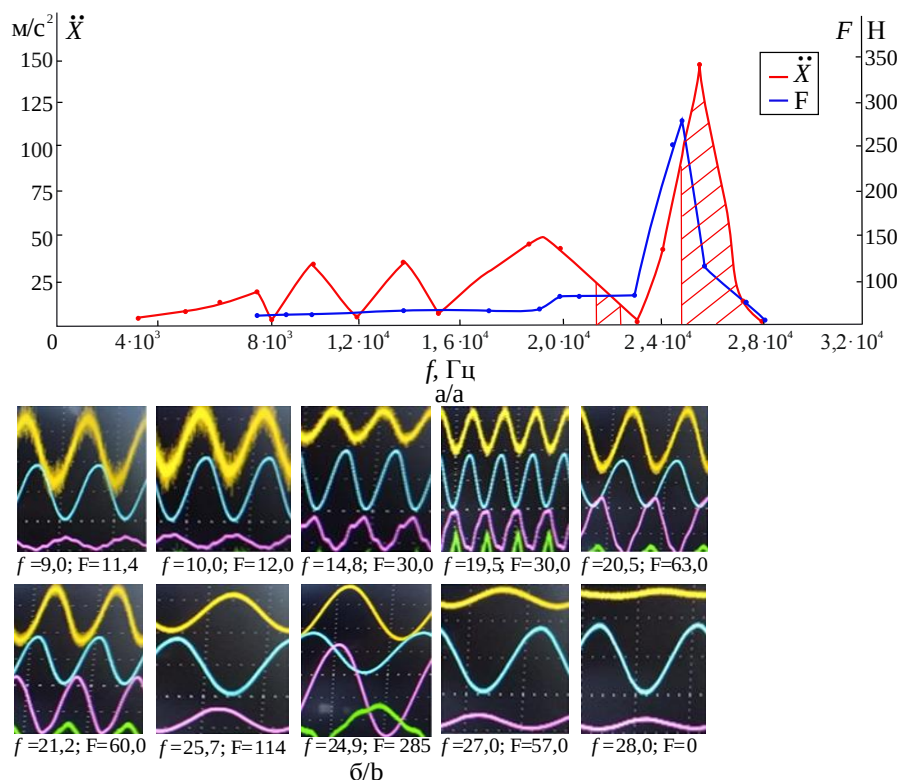


Рис. 13. Результаты экспериментальных исследований работы УЗ излучателя резонансного типа с нагрузкой в виде двух слоев ПММА: а) АЧХ сигнала силы многослойного пьезоактюатора и сигнала ускорения УЗ излучателя резонансного типа; б) формы временных зависимостей сигналов напряжения, силы и ускорения при разных частотах воздействия (в соответствии с АЧХ): f в кГц, F в Н

Fig. 13. Results of experimental studies of the ultrasonic resonance type emitter operation with a load in the form of two layers of polymethyl methacrylate: а) amplitude frequency characteristics of force and acceleration of ultrasonic resonance emitter multilayer PZT-stack; б) forms of temporal relationships of voltage, force and acceleration at different impact frequencies (according to amplitude frequency characteristic): f in kHz, F in N

Результаты проведенных экспериментальных исследований продемонстрировали возможность настройки УЗ излучателя резонансного типа при одностороннем доступе к объекту исследования по датчику силы.

Настройка резонанса через стенку элементов конструкции по сигналу датчика силы многослойного пьезоактюатора позволяет не располагать датчик ускорения внутри емкости или на толкателе УЗ излучателя, что существенно упрощает конструкцию УЗ излучателя резонансного типа.

Заключение

1. В технике для идеальной колебательной системы определение резонанса и отдельная настройка резонансного режима работы возможны по трем критериям:

- максимальной амплитуде колебания;
- нулевой фазе между силой и виброскоростью;
- гармонической форме виброскорости.

На практике для точной настройки резонанса КС требует два датчика: датчик силы многослойного пьезоактюатора и датчик ускорения (акселерометр).

2. Показано, что для практических целей можно использовать дополнительные критерии: амплитуду сигнала датчика силы и синусоидальные формы сигнала датчика силы.

3. Для идеальной КС с чисто синусоидальной силой возбуждения по всей АЧХ вибро смещения (вибро ускорения) в установившемся режиме работы форма колебаний подвижных частей УЗ излучателя будет синусоидальной.
4. При математическом моделировании влияние собственных частот КС, неточности изготовления и настройки УЗ излучателя приблизительно можно учесть импульсным периодическим возмущением. При этом квази-гармонические колебания КС появляются только в районе резонансных частот, а чистая синусоида вибро смещения – только на резонансе.
5. Экспериментально доказано, что настройка на резонансный режим КС УЗ излучателя резонансного типа возможна по одному датчику силы, который расположен последовательно с многослойным пьезоактюатором и не требует дополнительных конструктивных элементов для его крепления, что особенно важно при одностороннем доступе к объекту исследования.
6. Сигналы силы пьезоактюатора и ускорения качественно похожи по всей АЧХ и имеют максимальное значение амплитуды на близких частотах. Самые гармонические сигналы силы и ускорения наблюдаются в районе резонансной частоты, что позволяет более точно настроить КС на резонанс.

7. Настройка резонанса КС по сигналу датчика силы многослойного пьезоактюатора при одностороннем доступе к объекту существенно упрощает процесс обработки УЗ излучателем резонансного

типа технологических жидкостей через элементы конструкции резервуара.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FSWM-2020-0036).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лоскутова Ю.В., Юдина Н.В. Влияние условий низкочастотного акустического воздействия на стабильность водонефтяных эмульсий нефти Игнялинского месторождения // *Химия в интересах устойчивого развития*. – 2020. – Т. 28. – № 3. – С. 266–272.
2. Идентификация параметров механической системы вибрационного электромагнитного активатора по граничным окolorезонансным частотам / А.Н. Гаврилин, С.Н. Кладиев, А.С. Глазырин, Е.В. Боловин, В.И. Полищук // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2019. – Т. 330. – № 4. – С. 158–177.
3. Нелинейное алгебраическое оценивание индуктивности вибрационного электромагнитного активатора по кривой затухания тока / А.С. Глазырин, В.В. Аникин, Д.С. Буньков, Д.И. Антякин, Ю.Н. Старцева, В.З. Ковалев, Р.Н. Хамитов, С.Н. Кладиев, А.А. Филиппас // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2020. – Т. 331. – № 1. – С. 148–157.
4. Резонансные колебания с предельной амплитудой в вибрационном электромагнитном активаторе / А.Н. Гаврилин, Е.В. Боловин, А.С. Глазырин, С.Н. Кладиев, В.И. Полищук // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2019. – Т. 330. – № 1. – С. 201–213.
5. Гусев В.А., Руденко О.В. Поля радиационных сил и акустические течения в жидком слое на твердом полупространстве // *Акустический журнал*. – 2019. – Т. 65. – № 2. – С. 166–181.
6. Мансфельд А.Д., Рейман А.М. О возможности измерения коэффициента затухания ультразвука в слоистых средах при одностороннем доступе к объекту // *Акустический журнал*. 2011. – Т. 57. – № 2. – С. 211–218.
7. Азин А.В., Богданов Е.П., Рикконен С.В. Моделирование передачи акустической энергии через многослойную систему для измерения реологических свойств углеводородов // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2023. – Т. 334. – № 3. – С. 186–196.
8. Математическое моделирование процесса ультразвуковой подготовки высоковязкой нефти к транспорту / А.В. Азин, Е.П. Богданов, С.А. Пономарев, Н.Н. Марицкий, С.В. Рикконен // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2021. – Т. 332. – № 4. – С. 114–122.
9. Математическое моделирование ультразвукового излучателя резонансного типа для подготовки высоковязкой нефти к транспорту / А.В. Азин, Е.П. Богданов, С.А. Пономарев, Н.Н. Марицкий, С.В. Рикконен // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2021. – Т. 332. – № 11. – С. 161–169.
10. Intensification of the processes of preparation of drilling and cement mortars using vibration jet activation methods / S.V. Rikkonen, M.A. Dmitrieva, V.N. Leitsin, S.V. Ponomarev, A.V. Azin // *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* – 2020. – V. 911. – № 012001.
11. Guz A.N., Bagno A.M. Effect of prestresses on the dispersion of Lamb waves in a system consisting of a viscous liquid layer and a compressible elastic layer // *International applied mechanics*. – 2018. – V. 54 (3). – P. 249–258.
12. Huang L., Liang J., Wu C. A three-dimensional indirect boundary integral equation method for modeling elastic wave scattering in a layered half-space // *Int. J. Solids Structures*. – 2019. – V. 169. – P. 81–94.
13. Пановко Я.Г. Основы прикладной теории упругих колебаний. – М.: Изд-во «Машиностроение», 1967. – 312 с.
14. Исакович М.А. Общая акустика. – М.: Наука, 1973. – 489 с.
15. Дьелесан Э., Руайе Д. Упругие волны в твердых телах. Применение для обработки сигналов / Пер. с франц под ред. В.В. Леманова. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1982. – 424 с.
16. Xu Y., Langbauer C., Hofstaetter H. The application of ultrasonic technology for cleaning oil contaminated sand // *SPE Asia Pacific Health, Safety, Security, Environment and Social Responsibility Conference*. – Kuala Lumpur, 2017. – 12 p.
17. Gong Jing. Study on deacidification process of waste internal combustion engine oil under the action of ultrasound // *IOP Conf. Ser.: Earth Environ.* – 2020. – V. 467. – № 012046. – 7 p.
18. Research on the transmission characteristics of air-coupled ultrasound in double-layered bonded structures / X.-G. Wang, W.-L. Wu, Z.-C. Huang, J.-J. Chang, N.-X. Wu // *Materials*. – 2018. – V. 11. – № 310.
19. Thin film flexible/bendable acoustic wave devices: Evolution, hybridization and decoupling of multiple acoustic wave modes / R. Tao, W.B. Wang, J.T. Luo, S.A. Hasan, H. Torun, P. Canyelles-Pericas, J. Zhou, W.P. Xuan, M.D. Cooke, D. Gibson, Q. Wu, W.P. Ng, J.K. Luo, Y.Q. Fu // *Surface & Coatings Technology*. – 2019. – V. 357. – P. 587–594.
20. Guiding and splitting Lamb waves in coupled-resonator elastic waveguides / Y.-F. Wang, T.-T. Wang, J.-P. Liu, Y.-S. Wang, V. Laude // *Composite Structures*. – 2018. – V. 206. – P. 588–593.
21. Falleta S., Monegato G., Scuderi L. On the discretization and application of two space-time boundary integral equations for 3D wave propagation problems in unbounded domains // *Applied Numerical Mathematics*. – 2018. – V. 124. – P. 22–43.

Поступила: 01.08.2023 г.

Прошла рецензирование: 18.09.2023 г.

Информация об авторах

Азин А.В., кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Научно-исследовательского института прикладной математики и механики Национального исследовательского Томского государственного университета.

Богданов Е.П., кандидат технических наук, доцент Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Васильев А.В., аспирант, инженер-исследователь Научно-исследовательского института прикладной математики и механики Национального исследовательского Томского государственного университета.

Пономарев С.А., инженер-исследователь Научно-исследовательского института прикладной математики и механики Национального исследовательского Томского государственного университета.

Пономарев С.В., доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, заведующий отделом Научно-исследовательского института прикладной математики и механики Национального исследовательского Томского государственного университета.

Рикконен С.В., кандидат технических наук, инженер-исследователь Научно-исследовательского института прикладной математики и механики Национального исследовательского Томского государственного университета.

UDC 534.22

CONFIGURATIONS OF ULTRASONIC EMITTER RESONANCE MODES FOR UNILATERAL ACCESS TO AN OBJECT

Anton V. Azin¹,
antonazin@niipmm.tsu.ru

Eugene P. Bogdanov²,
bep@tpu.ru

Alexander V. Vasilyev¹,
alphantomsk@yandex.ru

Sergey A. Ponomarev¹,
doc.sergeyponomarev@gmail.com

Sergey V. Ponomarev¹,
psv@niipmm.tsu.ru

Sergey V. Rikkonen¹,
s.rikkonen@yandex.ru

¹ National Research Tomsk State University,
36, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

² National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

Relevance. To prepare high-viscosity oil for transport, a number of methods are used in practice: thermal, chemical and the method of physical influences. Ultrasonic exposure of hydrocarbon raw materials is one of the physical methods. It is necessary to develop an effective method for tuning an ultrasonic emitter for maximum energy transfer into a multilayer technological medium.

Aim: to study resonant operating modes of an ultrasonic emitter in a multilayer system with unilateral access to the object with simplified design of a resonance type ultrasonic emitter.

Objects: oscillating system of an ultrasonic resonant type emitter, multilayer system, physical model of a system «ultrasonic emitter – multilayer system».

Methods: mathematical modeling of linear oscillating system to determine the properties of oscillating system influence and technological factors on the form of vibration oscillations and on the amplitude-frequency characteristics of the system; experimental research on the basis of the physical model «ultrasonic emitter – multilayer system».

Results. The authors have revealed a physical feature of the oscillatory system operation, which consists in the fact that at resonance the form of oscillations of the force signals of a multilayer piezoactor and vibration acceleration signals are purely harmonic in nature. This effect extends to operation of a resonant-type ultrasonic emitter in a short-circuit mode on a multilayer system. It was found that force and vibration acceleration amplitude-frequency characteristics of a multilayer piezoactor are similar to each other. Based on the analysis of theoretical and experimental data, the authors developed the method for adjusting the resonant operating modes of an ultrasonic emitter with unilateral access to an object. This allows simplification and reduction in the emitter design cost. The method for setting up oscillatory systems is applicable for laboratory and industrial installations.

Conclusion. The research results show that in practice, harmonic shape of acceleration and force signals, as well as force amplitude of a multilayer piezoactor can be used as criteria for determining and adjusting the resonance of an oscillatory system. The oscillatory system of a resonant-type ultrasonic emitter can be tuned to resonance according to the shape and amplitude of the signal from the force sensor of the multilayer piezoactor. The force sensor is located in series with the multilayer piezoactor and does not require additional structural elements for its fastening. The ultrasonic emitter design is greatly simplified due to the absence of a vibration acceleration sensor. The method of adjusting the resonance of an oscillatory system using only a force sensor is also applied when operating a resonant-type ultrasonic emitter to a multilayer mechanical system. The developed design and technique for tuning the oscillatory system of a resonant-type ultrasonic emitter can be conveniently used when influencing process fluids through the walls of tanks and storage tanks.

Key words:

ultrasonic emitter, radiation energy, resonance, force sensor, acceleration sensor, frequency characteristics, multilayer system.

The work was carried out within the framework of the State mission of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (theme FSWM-2020-0036).

REFERENCES

1. Loskutova Yu.V., Yudina N.V. Effect of the conditions of low-frequency acoustic treatment on the stability of oil-water emulsions of oil from the Ignalinskoye deposit. *Chemistry for Sustainable Development*, 2020, vol. 28, no. 3, pp. 266–272. In Rus. DOI: 10.15372/KhUR2020228.
2. Gavrilin A.N., Kladiev S.N., Glazyrin A.S., Bolovin E.V., Polishchuk V.I. Identification of parameters of vibration electromagnetic activator mechanical system using limiting nearreso-

- nance frequency. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 4, pp. 158–177. In Rus.
3. Glazyrin A.S., Anikin V.V., Bunkov D.S., Antyaskin D.I., Startseva Yu.N., Kovalev V.Z., Khamitov R.N., Kladiev S.N., Philipas A.A. Nonlinear algebraic estimation of a vibration electromagnetic activator inductivity by a failing current curve. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 1, pp. 148–157. In Rus.
 4. Gavrilin A.N., Bolovin E.V., Glazyrin A.S., Kladiev S.N., Polishchuk V.I. Resonant oscillations with a limiting amplitude in a vibration electromagnetic activator. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 1, pp. 201–213. In Rus.
 5. Gusev V.A., Rudenko O.V. Radiation force fields and acoustic flows in a liquid layer on a solid half-space. *Acoustical physics*, 2019, vol. 65, no. 2, pp. 166–181. In Rus.
 6. Mansfel'd A.D., Reiman A.M. The possibility of measuring the coefficient of ultrasound attenuation in a one-side accessible layered medium. *Acoustical Physics*, 2011, vol. 57, no. 2, pp. 208–215. In Rus.
 7. Azin A.V., Bogdanov E.P., Rikkonen S.V. Simulation of acoustic energy transfer through a multilayer system for changing the rheological properties of hydrocarbons. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2023, vol. 334, no. 3, pp. 186–196. In Rus.
 8. Azin A.V., Bogdanov E.P., Ponomarev S.A., Maritsky N.N., Rikkonen S.V. Mathematical modelling of high-viscous oil ultrasonic preparation for transport. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 4, pp. 114–122. In Rus.
 9. Azin A.V., Bogdanov E.P., Ponomarev S.A., Maritsky N.N., Rikkonen S.V. Mathematical modeling of a resonant-type ultrasonic emitter for preparing high-viscosity oil for transport. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 11, pp. 161–169. In Rus.
 10. Rikkonen S.V., Dmitrieva M.A., Leitsin V.N., Ponomarev S.V., Azin A.V. Intensification of the processes of preparation of drilling and cement mortars using vibration jet activation methods. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, vol. 911, no. 012001. DOI: 10.1088/1757-899X/911/1/012001.
 11. Guz A.N., Bagno A.M. Effect of prestresses on the dispersion of Lamb waves in a system consisting of a viscous liquid layer and a compressible elastic layer. *International applied mechanics*, 2018, vol. 54 (3), pp. 249–258.
 12. Huang L., Liang J., Wu C. A three-dimensional indirect boundary integral equation method for modeling elastic wave scattering in a layered half-space. *International Journal of Solids and Structures*, 2019, vol. 169, pp. 81–94.
 13. Panovko Ya.G. *Osnovy prikladnoy teorii uprugikh kolebaniy* [Fundamentals of the applied theory of elastic oscillations]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1967. 312 p.
 14. Isakovich M.A. *Obshchaya akustika* [General acoustics]. Moscow, Nauka Publ., 1973. 489 p.
 15. Dieulesaint E., Royer D. *Uprugie volny v tverdykh telakh. Primenenie dlya obrabotki signalov* [Elastic waves in solids. Application for signal processing]. Moscow, Nauka Publ., 1982. 424 p.
 16. Xu Y., Langbauer C., Hofstaetter H. The application of ultrasonic technology for cleaning oil contaminated sand. *SPE Asia Pacific Health, Safety, Security, Environment and Social Responsibility Conference*. Kuala Lumpur, 2017. 12 p.
 17. Gong Jing. Study on deacidification process of waste internal combustion engine oil under the action of ultrasound. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, 2020, vol. 467, no. 012046, 7 p. DOI: 10.1088/1755-1315/467/1/012046.
 18. Wang X.-G., Wu W.-L., Huang Z.-C., Chang J.-J., Wu N.-X. Research on the transmission characteristics of air-coupled ultrasound in double-layered bonded structures. *Materials*, 2018, vol. 11, no. 310. DOI: 10.3390/ma11020310.
 19. Tao R., Wang W.B., Luo J.T., Hasan S.A., Torun H., Canyelles-Pericas P., Zhou J., Xuan W.P., Cooke M.D., Gibson D., Wu Q., Ng W.P., Luo J.K., Fu Y.Q. Thin film flexible/bendable acoustic wave devices: evolution, hybridization and decoupling of multiple acoustic wave modes. *Surface & Coatings Technology*, 2019, vol. 357, pp. 587–594.
 20. Wang Y.-F., Wang T.-T., Liu J.-P., Wang Y.-S., Laude V. Guiding and splitting Lamb waves in coupled-resonator elastic waveguides. *Composite Structures*, 2018, vol. 206, pp. 588–593.
 21. Falleta S., Monegato G., Scuderi L. On the discretization and application of two space-time boundary integral equations for 3D wave propagation problems in unbounded domains. *Applied Numerical Mathematics*, 2018, vol. 124, pp. 22–43.

Received: 1 August 2023.

Reviewed: 18 September 2023.

Information about the authors

Anton V. Azin, Cand. Sc., senior researcher, National Research Tomsk State University.

Eugene P. Bogdanov, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Alexander V. Vasilyev, postgraduate, research engineer, National Research Tomsk State University.

Sergey A. Ponomarev, research engineer, National Research Tomsk State University.

Sergey V. Ponomarev, Dr. Sc., senior researcher, head of the division, National Research Tomsk State University.

Sergey V. Rikkonen, Cand. Sc., research engineer, National Research Tomsk State University.

УДК 621.039.59

ВОЗМОЖНОСТЬ ИЗВЛЕЧЕНИЯ УРАНА ИЗ ОТРАБОТАВШЕГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА В РАСПЛАВЛЕННЫХ ЭЛЕКТРОЛИТАХ, СОДЕРЖАЩИХ РЕДКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ

Никитин Дмитрий Игоревич¹,
nikitin.dmitry@urfu.ru

Половов Илья Борисович¹,
i.b.polovov@urfu.ru

Ребрин Олег Иринархович¹,
o.i.rebrin@urfu.ru

¹ Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина,
Россия, 620062, г. Екатеринбург, ул. Мира, 21.

Актуальность исследования обусловлена планами использования электролитического разделения металлизированного отработавшего ядерного топлива как одного из этапов пирохимической переработки смешанного нитридного уран-плутониевого отработавшего топлива.

Цель: определение параметров процесса электролитического выделения урана из сплава с имитаторами продуктов деления (благородных металлов и редкоземельных элементов), моделирующих отработавшее ядерное топливо, в солевых смесях на основе $3\text{LiCl}-2\text{KCl}$ с добавками хлоридов редкоземельных элементов.

Объекты: образцы модельного отработавшего ядерного топлива – сплава урана с имитаторами продуктов деления (благородных металлов и редкоземельных элементов) при массовом соотношении $\text{Pd:Ru:Ag:Rh}=25:1:3:3$, $\text{Nd:Ce:La:Pr:Sm:Y}=15:10:5:5:1$.

Методы: гальваностатическое электрорафинирование, рентгенофлуоресцентный и рентгенофазовый методы анализа, масс-спектрометрия с индуктивно-связанной плазмой, оценка распределения компонентов по системе.

Результаты. Полученные данные показали, что при температуре 550°C катодные осадки представляют собой типичные дендритные формы альфа-урана в ромбической сингонии со склонностью к иглообразованию при увеличении катодной плотности тока. Полученные катодные осадки свободны от примесей рутения, родия, молибдена, празеодима и иттрия. Коэффициент очистки по палладию достигает 3000, а по серебру – 1700. Благородные металлы накапливаются в анодном шламе, при этом даже при полной выработке анодного материала концентрация этой группы элементов в катодном осадке не превышает $0,0015 \text{ мас. \%}$. Несмотря на высокую концентрацию хлоридов РЗЭ в электролите, имитирующую накопление ионов РЗЭ при многократной переработке отработавшего ядерного топлива, концентрация редкоземельных металлов в катодном продукте не превышала $0,007 \text{ мас. \%}$. При электровыделении урана из модельного отработавшего ядерного топлива в электролите $3\text{LiCl}-2\text{KCl}-\text{UCl}_3$ ($10,1 \text{ мас. \%}$) с добавкой хлоридов РЗЭ, имитирующей при многократной переработке их накопление в электролите, при 550°C , а также начальной катодной плотности тока $0,2 \text{ А/см}^2$, удельном количестве электричества $1,0 \text{ А·ч/см}^2$, при полной выработке анодной массы, выделяется катодный осадок урана с выходом по току, превышающим $90 \text{ \%}$, и с коэффициентами очистки по сумме редкоземельных металлов 76, по сумме благородных металлов 1800.

Ключевые слова:

электролитическое выделение, электрорафинирование, катодная плотность тока, урановые сплавы, переработка отработавшего ядерного топлива, модельное отработавшее ядерное топливо.

Введение

Одной из важнейших целей развития атомной энергетики является замыкание ядерного топливного цикла. Для достижения данной цели необходимо иметь химическую технологию переработки отработавшего ядерного топлива (ОЯТ). В настоящее время существует технология переработки ОЯТ с использованием экстракционного процесса PUREX. Данная технология позволяет перерабатывать ОЯТ, но при этом генерирует большое количество жидких радиоактивных отходов. В этой связи в мире активно развиваются пирохимические технологии, позволяющие в будущем заменить или дополнить PUREX процесс [1]. Одной из таких технологий является электрорафинирование металлизированного ОЯТ в расплаве эвтектической смеси хлоридов лития и калия. На текущий момент параметры подобного процесса получения целевых компонентов ОЯТ (урана и плутония) были подробно изучены в лабораторном масштабе различными авторами [1–18]. Для решения данной задачи обычно использу-

ют твердые катоды [1–11, 17, 18], но в литературе представлены эксперименты и с жидкими катодами [12–16], а также с совместным использованием твердых и жидких катодов [12–13]. Существенные объемы загрузки анода и выделения урана на катоде в расплавленной соли на основе $3\text{LiCl}-2\text{KCl}$ были подробно описаны в нескольких работах [7–9, 17]. Например, в работе [9] авторами представлены эксперименты в ванне, рассчитанной на получение 1000 кг урана в год.

Сведения об исследовании электровыделения урана из ОЯТ или его моделирующих сплавов в литературе отсутствуют. Нет сведений и о влиянии накопления хлоридов РЗЭ в электролите, которое возникает при многократно повторяющемся электролитическом процессе.

Задачей настоящей работы было экспериментальное подтверждение полученных ранее параметров электровыделения урана [17–19] из сплава, моделирующего ОЯТ, при имитации накопления хлоридов РЗЭ в электролите.

Материалы и методы исследования

В качестве рабочих солей-растворителей в экспериментах использовали хлорид калия (99,8 %) и хлорид лития (99,9 %). Отдельные хлориды щелочных металлов дополнительно очищали по методике, описанной в работе [18]. Подвергнутые дополнительной очистке соли хранили в сухом боксе, заполненном высокочистым аргоном (с контролем H_2O и $O_2 < 10$ ppm). Смеси хлоридов лития и калия требуемого состава готовили в сухом боксе путем тщательного перемешивания очищенных индивидуальных солей непосредственно перед экспериментами. Подготовка урансодержащих хлоридных расплавов описана в предыдущих работах [20].

Модельное отработавшее ядерное топливо (МОЯТ) представляет собой урановый сплав, содержащий благородные и редкоземельные металлы, который синтезировали в печи резистивного нагрева прямым сплавлением металлических компонентов с чистотой не ниже 99,9 %. В качестве контейнера использовали тигли из оксида бериллия, атмосфера процесса – высокочистый аргон (99,998 %). Полученные слитки отделяли от тигля и подвергали травлению в химически чистой азотной кислоте. Затем слитки промывали дистиллированной водой и перемещали в сухой бокс, с предварительной сушкой слитков под вакуумом в шлюзе бокса. Фотографии полученных МОЯТ, представлены на рис. 1.

Опыты по электролитическому выделению урана проводили на укрупненном лабораторном электролизере из нержавеющей стали. Детали конструкции электролизера приведены на рис. 2.

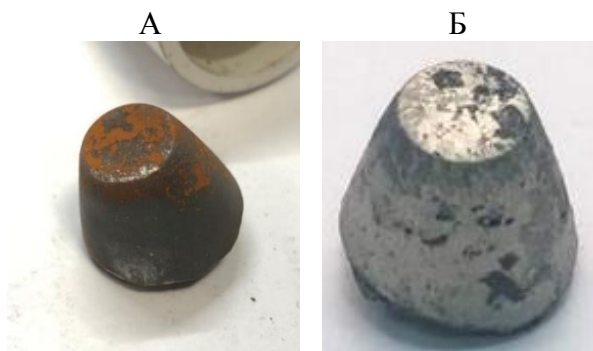


Рис. 1. Фотографии урановых сплавов: А) до травления; Б) после травления

Fig. 1. Photos of uranium alloys: А) before etching; Б) after etching

Основными достоинствами данного электролизёра являются:

- большая рабочая камера, позволяющая производить загрузку до 1000 г электролита;
- съемная шлюзовая камера, позволяющая периодически заменять катоды, а также производить пробоотбор и дозагрузку электролита без остановки эксперимента.

Анодный узел представлял собой несущий токоподвод, выполненный из стержня высокочистого молибдена (МЧ, 99,98 %), на который через резьбовое

соединение закреплены токоподводы, выполненные из проволоки высокочистого молибдена, закрученной на концах в спираль. Спиральное окончание токоподводов служило контейнерами для рафинируемого сплава (рис. 3). Анодный узел крепился к крышке через диэлектрическое соединение, которое позволяло фиксировать узел в нужном положении.

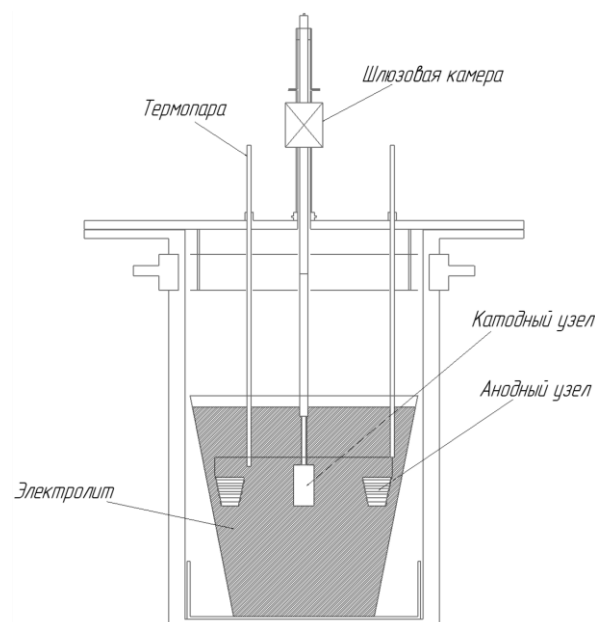


Рис. 2. Схема электролизера для рафинирования МОЯТ

Fig. 2. Scheme of electrolyzer for refining model spent nuclear fuel



Рис. 3. Молибденовая корзина с загруженными образцами

Fig. 3. Molybdenum basket with loaded samples

Анодный узел заполняли слитками МОЯТ так, чтобы анодная плотность тока не превышала $0,01 \text{ A/cm}^2$. Процесс электровыделения осуществляли в тигле-контейнере из стеклоуглерода объемом 2 л, в который загружали расчетное количество электролита.

В качестве катода использовали цилиндрические прутки из металлического молибдена (рис. 4). Площадь поверхности катодов составляла 10 cm^2 . Токоподвод к катоду на границе расплава и газовой фазы

защищали трубкой из оксида бериллия. Токопровод был выполнен при помощи резьбового соединения, позволяющего производить периодическую замену катода в процессе экспериментов.



Рис. 4. Фотография катодной сборки (катод – слева)

Fig. 4. Photo of the cathode assembly (the cathode is on the left)

После сборки укрупненный лабораторный электролизер вакуумировали и наполняли высокочистым аргоном. В ходе экспериментов в рабочем пространстве аппарата постоянно поддерживалась инертная атмосфера. Нагрев рабочей зоны электролизера осуществляли шахтной электропечью СШО-Л-8/11. Необходимая температура задавалась и поддерживалась высокоточным температурным контроллером с ПИД-регулятором (± 5 °C). Температуру расплава контролировали с помощью кабельной термопары типа хромель-алюмель, связанной с цифровым вольтметром АКИП-2101-ПриСТ. После расплавления электролита в него последовательно опускали анодный узел и кварцевый чехол с термопарой. Катодный узел помещали в шлюзовую камеру электролизера, которую вакуумировали и наполняли аргоном 2–3 раза, после чего открывали шибер и опускали катод в электролит. После прогрева катода и стабилизации температуры включали электрический ток. В процессе опыта контролировали температуру электролита, ток электролиза, напряжение на ванне. По завершении прохождения заданного количества электричества, ток электролиза отключали, катод медленно поднимали в шлюзовую камеру электролизера, закрывали шибер и производили съем катодного узла. Извлеченный из электролизера катод с осадком фотографировали, взвешивали и производили отмывку.

Катод с осадком опускали в раствор 1 М химически чистой азотной кислоты на непродолжительное время – 5–10 минут (рис. 5).

По окончании растворения электролита с поверхности катода катодный осадок количественно отделяли механически с помощью гребка, изготовленного из никелевой полосы (99,9 %). Затем операцию повторяли до полного удаления осадка с катода (рис. 6).

Далее осадок катодного урана промывали в растворе 1 М азотной кислоты до получения прозрачного раствора. Отмывка катодного осадка в азотной кислоте при данной концентрации и продолжительности времени происходит практически без потерь урана [21]. Затем катодный осадок промывали дистиллированной водой, а контрольную промывку производили в растворе этилового спирта (95 %). По окончании отмывки спирт декантировали, а катодный осадок урана направляли на сушку в шлюзовую камеру

инертного бокса, где осадок держали под вакуумом не менее 2 часов. По окончании сушки катодного осадка шлюзовую камеру наполняли высокочистым аргоном, открывали задвижку, и осадок перемещали на хранение в инертный бокс, в котором содержание примесей кислорода и влаги контролировалось на уровне ниже 10 ppm.



Рис. 5. Катод с осадком урана, помещенный в раствор азотной кислоты

Fig. 5. Cathode with uranium deposit placed in a nitric acid solution

Практически на протяжении всех экспериментов катодный осадок содержал мелкие частицы урана (рис. 7), что предъявляло повышенные требования к безопасности при работе с веществом в соответствии с основными санитарными правилами обеспечения радиационной безопасности.



Рис. 6. Процесс очистки катода от осадка урана

Fig. 6. Cathode purification from uranium deposit



Рис. 7. Очищенный катодный уран

Fig. 7. Purified cathodic uranium

Хранение и дальнейшее обращение с катодными осадками урана производили только при постоянно контролируемой инертной атмосфере.

После завершения операций с катодным осадком в шлюз лабораторного электролизера устанавливали специальный узел для отбора пробы электролита. После завершения пробоотбора узел заменяли на катодный и повторяли операции, описанные выше.

Результаты исследования и обсуждение

Предварительно были изготовлены образцы МОЯТ, представляющие собой сплав урана с различным содержанием имитаторов благородных металлов (БМ) и РЗЭ (при массовом соотношении БМ=Pd:Ru:Ag:Rh=25:1:3:3, РЗЭ=Nd:Ce:La:Pr:Sm:Y=15:10:5:5:1 (табл. 2).

Таблица 1. Состав уранового сплава (МОЯТ), подвергнутый электроочистке

Table 1. Composition of the uranium alloy (model spent nuclear fuel) subjected to electrical cleaning

Компонент сплава Alloy component	Масса, г Mass, g	Содержание в общей массе, мас. % Content in total weight, wt. %
U	136,930	98,641
Pd	1,326	0,955
Ru	0,055	0,040
Rh	0,160	0,115
Ag	0,162	0,117
Nd	0,064	0,046
Ce	0,044	0,032
La	0,022	0,016
Pr	0,022	0,016
Sm	0,026	0,019
Y	0,005	0,004
$\sum_{\text{БМ}}/\sum_{\text{NM}}$	1,703	1,227
$\sum_{\text{РЗМ}}/\sum_{\text{REE}}$	0,183	0,132

Состав компонентов электролита, представленных в расплаве в виде хлоридов, приведен в табл. 2.

Температура во всех опытах была постоянной и составляла 550 °С, удельное количество пропущенного электричества 1 А·ч/см². Полученные катодные осадки имеют характерную дендритную форму альфа-урана в ромбической сингонии, фотографии осадков представлены на рис. 8. Была обнаружена закономерная тенденция роста иглообразования с увеличением катодной плотности тока, которая наблюдалась ранее [17, 18]. При увеличении начальной катодной плотности тока от 0,1 до 0,4 А/см² осадок приобретает выраженную игольчатую форму, что, с одной стороны, существенно облегчает его съем с катода, но, с другой стороны, снижает выход по току вследствие замыкания катода и анода ванны растущими по направлению силовых линий иглами осадка.

Таблица 2. Состав электролита на основе эвтектической смеси LiCl и KCl перед началом экспериментов

Table 2. Electrolyte composition based on a eutectic mixture of LiCl and KCl before the experiments

Компонент электролита Electrolyte component	Содержание мас. % (по металлу) Content wt. % (by metal)
U	7,01
Nd	0,55
Ce	0,18
La	0,09
Pr	0,09
Sm	0,09
Y	0,01

Катодные осадки были подвергнуты химическому анализу, результаты которого приведены в табл. 3, 4.

По окончании экспериментов из установки был извлечен анодный узел, в котором, как и ожидалось, не осталось анодной массы вследствие осыпания нерастворимых компонентов сплава (рис. 9). Замороженный электролит был извлечен из установки и помещен в сухой перчаточный бокс.

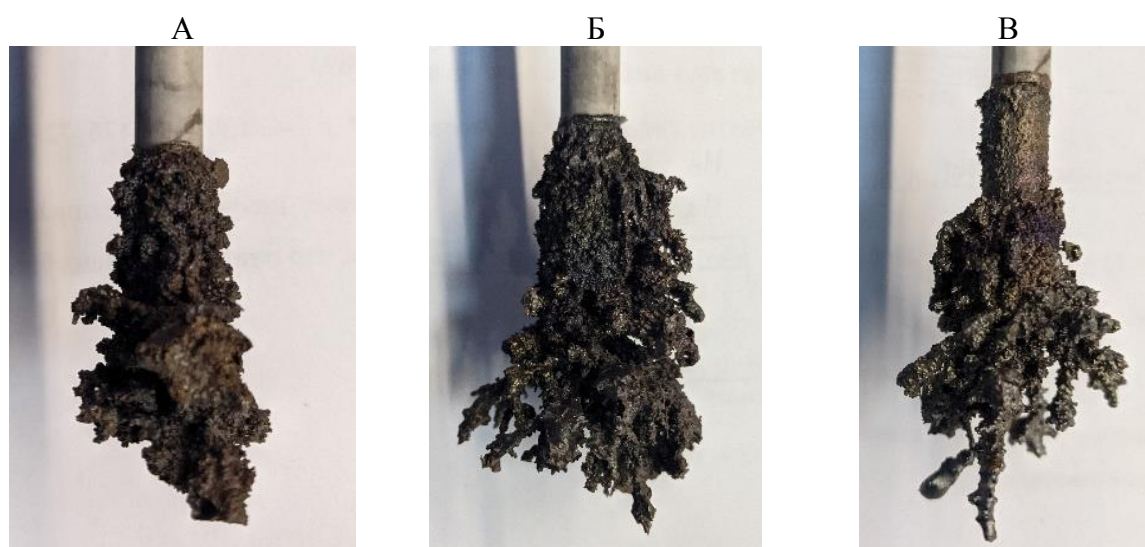


Рис. 8. Катодные осадки урана, полученные в ходе электроочистки МЯТ при различных начальных катодных плотностях тока, А/см²: А) 0,1; Б) 0,2; В) 0,4

Fig. 8. Uranium cathodic deposits obtained during the electrical purification of model nuclear fuel at various initial cathode current densities, А/см²: А) 0,1; Б) 0,2; В) 0,4

Таблица 3. Содержание редкоземельных металлов (мас. %) в катодном продукте, полученном в ходе электролитической переработки МОЯТ

Table 3. Content of rare earth metals (wt. %) in the cathode product obtained during the electrolytic processing of model spent nuclear fuel

Элемент Element	Анод Anode	Продукт, полученный при различных катодных плотностях тока, А/см ² Product obtained at different cathode current densities, A/cm ²		
		0,1	0,2	0,4
Nd	$4,6 \cdot 10^{-2}$	$5,8 \cdot 10^{-3}$	$1,3 \cdot 10^{-3}$	$4,2 \cdot 10^{-3}$
Ce	$3,2 \cdot 10^{-2}$	$3,7 \cdot 10^{-4}$	$2,5 \cdot 10^{-4}$	$1,3 \cdot 10^{-4}$
La	$1,6 \cdot 10^{-2}$	$5,6 \cdot 10^{-4}$	$1,6 \cdot 10^{-4}$	$4,7 \cdot 10^{-4}$
Pr	$1,6 \cdot 10^{-2}$	не обнаружен not detected		
Sm	$1,9 \cdot 10^{-2}$	$4,1 \cdot 10^{-4}$	$6,0 \cdot 10^{-5}$	$3,4 \cdot 10^{-4}$
Y	$4,0 \cdot 10^{-3}$	не обнаружен not detected		
$\sum_{РЗЭ}$	$1,3 \cdot 10^{-1}$	$7,1 \cdot 10^{-3}$	$1,7 \cdot 10^{-3}$	$5,1 \cdot 10^{-3}$

Таблица 4. Содержание благородных металлов и молибдена (мас. %) в катодном продукте, полученном в ходе электролитической переработки МОЯТ

Table 4. Content of noble metals and molybdenum (wt. %) in the cathode product obtained during the electrolytic processing of model spent nuclear fuel

Элемент Element	Анод Anode	Продукт, полученный при различных катодных плотностях тока, А/см ² Product obtained at different cathode current densities, A/cm ²		
		0,1	0,2	0,4
Pd	$9,6 \cdot 10^{-1}$	$8,8 \cdot 10^{-4}$	$5,9 \cdot 10^{-4}$	$3,2 \cdot 10^{-4}$
Ru	$4,0 \cdot 10^{-2}$	не обнаружен not detected		
Rh	$1,2 \cdot 10^{-1}$	$1,0 \cdot 10^{-5}$	не обнаружен not detected	
Ag	$1,2 \cdot 10^{-1}$	$6,7 \cdot 10^{-4}$	$7,0 \cdot 10^{-5}$	$2,8 \cdot 10^{-4}$
$\sum_{БМ}$ $\sum_{NM}$	1,2	$1,5 \cdot 10^{-3}$	$6,6 \cdot 10^{-4}$	$9,9 \cdot 10^{-4}$
Mo		не обнаружен not detected		

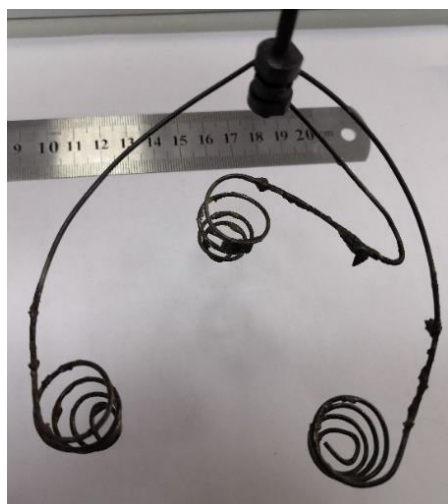


Рис. 9. Фотография анодной сборки после проведения экспериментов

Fig. 9. Photo of anode assembly after the experiments

Анодные шламы, которые образовывались в процессе электровыделения урана, осыпались и накапливались в донной части электролита. От замороженного электролита была отделена донная часть, которую поместили в 1 М раствор химически чистой азотной кислоты до полного растворения. Полученный раствор был отфильтрован через бумажный обеззоленный фильтр «синяя лента». Таким образом был получен осадок анодного шлама, который был направлен на рентгенофазовый анализ. Выполненный анализ показал присутствие в шламе благородных металлов в виде металлов и интерметаллидов, металлических РЗЭ, металлического молибдена, а также металлического урана.

Наличие урана в шламе связано с двумя факторами: отсутствием электролитического растворения интерметаллидов типа U_xBM_y , которые присутствуют в сплаве и осыпаются механически из корзины на дно ванны, а также осыпанием катодного урана в экспериментах с относительно высокой плотностью тока. В ранее проведенных экспериментах [18, 19, 22] было подтверждено, что в процессе электровыделения урана из сплавов U–Pd–Nd интерметаллиды UPd_3 и $NdPd_3$ не растворяются и осыпаются на дно ванны. Таким образом, практически все благородные металлы в виде металла и интерметаллидов переходят в анодный шлам.

Кроме того, в анодном шламе были обнаружены редкоземельные металлы, которые не растворились в электролите, а осыпались на дно ванны. Данный процесс может быть связан с несколькими факторами:

- ликвацией и расслоением сплава при сплавлении анода, что можно обнаружить на примере диаграмм плавкости систем U–Nd, U–Pd–Nd [23, 24];
- отсутствием электролитического растворения интерметаллидов типа $РЗМ_xBM_y$, который присутствует в сплаве и осыпается механически из корзины на дно ванны [18];
- совместным механическим осыпанием (захватом) РЗМ и нерастворимых интерметаллидов.

Распределение масс компонентов в системе (табл. 5) показывает, что практически все благородные металлы в виде металла и интерметаллидов осыпаются в анодный шлам. Вследствие близости спектральных линий РЗЭ сложно различать их элементный состав, поэтому при анализе электролита и анодного шлама будут приведены данные, основанные на химическом анализе суммы РЗЭ.

Заключение

Повышение начальной катодной плотности тока приводит к изменению морфологии катодного осадка, который приобретает более игольчатую форму, что, с одной стороны, существенно облегчает его съем с катода, но, с другой стороны, увеличивает захват электролита. Вследствие роста игл катодного урана по направлению силовых линий, происходит рост вероятности замыкания катода и анода ванны, что приводит к снижению выхода по току, а также осыпанию катодного урана на дно ванны.

Таблица 5. Баланс перераспределения компонентов модельного ОЯТ

Table 5. Balance of redistribution of the model spent nuclear fuel components

Элемент Element	Исходная анодная масса, г Initial anode mass, g	Катодная масса, г Cathode mass, g	Электролит, г Electrolyte, g	Анодный шлам, г Anode sludge, g
Pd	1,3260	0,0001	0,0008	1,3251
Ru	0,0550	не обнаружен not detected	не обнаружен not detected	0,0550
Rh	0,1600	не обнаружен not detected	не обнаружен not detected	0,1600
Ag	0,1620	0,0003	0,0580	0,1037
$\sum_{\text{БМ}}$ $\sum_{\text{NM}}$	1,7030	0,0004	0,0588	1,6438
$\sum_{\text{PЗЭ}}$ $\sum_{\text{REE}}$	0,1830	0,0024	0,0390	0,1416

Показано, что рутений и родий полностью переходят в анодный шлам, в то время как палладий и серебро частично растворяются в электролите и, соответственно, переходят в катодный осадок урана. Коэффициенты очистки, по сумме БМ, зависят от начальной катодной плотности тока и составляют 800–1800.

Редкоземельные металлы растворяются из МОЯТ и накапливаются в электролите, что также способствует их переходу на катод и накоплению в катодном осадке. Тем не менее, даже с учетом увеличения концентрации в электролите хлоридов РЗЭ, в катодных осадках урана не были обнаружены металлический празеодим и иттрий. Коэффициенты очистки, по сумме редкоземельных металлов, зависели от начальной катодной плотности тока и составили 18–76.

Начальная катодная плотность тока, при которой достигнуты наилучшие показатели выхода по току, захвата электролита, коэффициентов очистки по РЗЭ и БМ, составила 0,2 А/см².

Показано, что полученные катодные осадки свободны от примесей рутения, родия, молибдена, празеодима и иттрия. Коэффициент очистки по палладию достигает 3000, а по серебру – 1700. Благородные металлы накапливаются в анодном шламе, при этом даже при полной выработке анодного сплава концентрация этой группы элементов в катодном осадке не превышает 0,0015 мас. %. Несмотря на дополнительное увеличение содержания хлоридов РЗЭ в электролите, имитирующих накопление РЗЭ при многократной электролитической переработке ОЯТ, концентра-

ция редкоземельных металлов в катодном продукте не превышает 0,007 мас. %. При начальной катодной плотности тока электровыделения урана 0,2 А/см² концентрация РЗМ в катодном осадке снижается до 0,0017 мас. %, а концентрация суммы БМ – до 0,0006 мас. %, таким образом коэффициенты очистки увеличиваются, соответственно, до 76 по РЗМ и до 1800 по БМ.

Основные потери урана при данном способе его электровыделения связаны с несколькими факторами:

- механическим осыпанием катодного урана;
- отсутствием электролитического растворения интерметаллидов типа U_xBM_y, которые присутствуют в сплаве и осыпаются механически из корзины на дно ванны;
- совместным механическим осыпанием (захватом) урана и нерастворимых интерметаллидов.

Таким образом, показано, что при электровыделении урана из модельного ОЯТ в электролите 3LiCl–2KCl–UCl₃ (10,1 мас. %) с добавкой хлоридов РЗЭ, имитирующей накопление в электролите при многократной переработке, при 550 °С, а также начальной катодной плотности 0,2 А/см², удельном количестве электричества 1,0 А·ч/см² при полной выработке анодной массы выделяется катодный осадок урана с выходом по току, превышающим 90 %, и высокими коэффициентами очистки. Полученные ранее параметры электрорафинирования урановых сплавов [17–18] позволяют выделять уран из МОЯТ с высокими показателями процесса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Nawada H.P., Fukuda K. Role of pyro-chemical processes in advanced fuel cycles // Journal of Physics and Chemistry of Solids. – 2005. – V. 66. – № 2–4. – P. 647–651.
2. Driggs F.H., Lilliendahl W.C. Preparation of metal powders by electrolysis of fused salts: I-ductile uranium // Industrial and Engineering Chemistry. – 1930. – V. 22. – № 5. – P. 516–519.
3. Kolodney M. Production of plutonium by electrolysis // Los Alamos National Laboratory Report. – 1944. – LA-148.
4. Kolodney M. Preparation of the first electrolytic plutonium and of uranium from fused chlorides // Journal of The Electrochemical Society. – 1982. – V. 129. – P. 2438.
5. Marzano C., Noland R.A. The electrolytic refining of uranium // Argonne National Laboratory Report. – 1953. – ANL-5102.
6. Niedrach L.W., Glamm A.C. Uranium purification by electrorefining // Journal of The Electrochemical Society. – 1956. – V. 103. – № 9. – P. 521–528.
7. Contribution a la connaissance du mecanisme de l'electroraffinage de l'uranium en bains de sels fondus / G. Boisdie, G. Chauvin, H. Coriou, J. Hure // Electrochimica Acta. – 1961. – V. 5. – № 1–2. – P. 54–71.
8. Chauvin G., Coriou H., Simenauer A. Phenomene de concentration du fer au voisinage de la cathode au cours de l'electroraffinage de l'uranium en bains de sels fondus // Electrochimica Acta. – 1963. – V. 8. – № 5. – P. 323–332.
9. Production d'uranium de haute purete par electroraffinage en bains de sels fondus / G. Chauvin, H. Coriou, P. Jabot, A. Laroche // Journal of Nuclear Materials. – 1964. – V. 11. – № 2. – P. 183–192.
10. Electrodeposition characteristics of uranium by using a graphite cathode / Y.H. Kang, J.H. Lee, S.C. Hwang, J.B. Shim, E.H. Kim, S.W. Park // Carbon. – 2006. – V. 44. – P. 3142.
11. Application of graphite as a cathode material for electrorefining of uranium / J.H. Lee, Y.H. Kang, S.C. Hwang, J.B. Shim, E.H. Kim, S.W. Park // Nuclear Technology. – 2008. – V. 162. – P. 135–143.

12. Uranium transport to solid electrodes in pyrochemical reprocessing of nuclear fuel / Z. Tomczuk, J.P. Ackerman, R.D. Wolson, W.E. Miller // Journal of The Electrochemical Society. – 1992. – V. 139. – № 12. – P. 3523–3528.
13. Willit J.L., Miller W.E., Battles J.E. Electrorefining of uranium and plutonium – a literature review // Journal of Nuclear Materials. – 1992. – V. 195. – № 3. – P. 229–249.
14. Sequential electrolysis of U-Pu alloy containing a small amount of Am to recover U- and U-Pu-Am products / M. Kuratal, N. Yahagi, S. Kitawaki, A. Nakayoshi, M. Fukushima // Journal of Nuclear Science and Technology. – 2009. – V. 46. – № 2. – P. 175–183.
15. Recovery of U-Pu alloy from MOX using a pyroprocess series / S. Kitawaki, T. Shinozaki, M. Fukushima, T. Usami, N. Yahagi, M. Kurata // Journal of Nuclear Materials. – 2007. – V. 162. – № 2. – P. 118–123.
16. Uranium recovery via electrochemical deposition with a liquid zinc cathode followed by electrochemical oxidation of rare earth metals / J. Jang, T. Kim, G.-Y. Kim, D. Yoon, S. Lee // Journal of Nuclear Materials. – 2019. – V. 520. – P. 245–251.
17. Uranium electrorefining in 3LiCl–2KCl based melts / D.I. Nikitin, D.A. Zolotarev, A.D. Mukhametdyanov, V.A. Volkovich, I.B. Polovov // ECS Transactions. – 2020. – V. 98. – № 10. – P. 443–451.
18. Никитин Д.И., Половов И.Б., Ребрин О.И. Электрорафинирование урановых сплавов, содержащих палладий и неодим в расплавах 3LiCl–2KCl–UCl₃ // Расплавы – 2023. – № 3. – С. 316–328.
19. Анодные процессы урановых сплавов, содержащих палладий и неодим в расплавах 3LiCl–2KCl–UCl₃ / Д.И. Никитин, И.Б. Половов, О.И. Ребрин, А.В. Щетинский, А.С. Дедюхин // Расплавы. – 2023. – № 2. – С. 144–155.
20. An electrochemical study of uranium behaviour in LiCl–KCl–CsCl eutectic melt / D.S. Maltsev, V.A. Volkovich, D.B. Vasin, E.N. Vladykin // Journal of Nuclear Materials. – 2015. – № 467. – P. 956–963.
21. Pierce R.A. Uranium metal dissolution in the presence of fluoride and boron // U.S. Department of Commerce. – 2003. – № VA-22161. – P. 1–21.
22. Изготовление интерметаллида UPd₃ и исследование его термодинамических характеристик / В.А. Кесикопулос, А.М. Потапов, А.Е. Дедюхин, Ю.П. Зайков // Электрохимия в распределенной и атомной энергетике: Сборник трудов семинара. – Нальчик: Ажур, 2022. – С. 224–226.
23. Haefling J.F., Daane A.H. The immiscibility limits of uranium with the rare-earth metals // Transactions of the Metallurgical Society of AIME. – 1959. – V. 215. – P. 336–338.
24. Parnell D.G., Brett N.H. Phase relationship in the ternary system U–Nd–Pd // Journal of the Less-Common Metals. – 1986. – № 118. – P. 141–152.

Поступила: 17.04.2023 г.

Прошла рецензирование: 24.04.2023 г.

Информация об авторах

Никитин Д.И., кандидат химических наук, инженер кафедры редких металлов и наноматериалов Физико-технологического института, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина.
Половов И.Б., кандидат химических наук, доцент кафедры редких металлов и наноматериалов Физико-технологического института, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина.
Ребрин О.И., доктор химических наук, заведующий кафедрой физико-химических методов анализа Физико-технологического института, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина.

UDC 621.039.59

POSSIBILITY OF URANIUM EXTRACTION FROM SPENT NUCLEAR FUEL IN FUSED ELECTROLITES CONTAINING RARE ELEMENTS

Dmitry I. Nikitin¹,
nikitin.dmitry@urfu.ru

Ilya B. Polovov¹,
i.b.polovov@urfu.ru

Oleg I. Rebrin¹,
o.i.rebrin@urfu.ru

¹ Ural Federal University,
21, Mira street, Ekaterinburg, 620062, Russia.

The relevance of the research is caused by the plans of using electrolytic separation of metalized spent nuclear fuel as a stage in pyrochemical reprocessing of mixed nitride uranium-plutonium fuel.

The main aim is to determine the parameters of uranium electrolytic separation from an alloy with simulators of fission products (precious metals and rare earth elements) simulating spent nuclear fuel in salt mixtures based on 3LiCl–2KCl with additives of rare earth element chlorides.

Objects: model spent nuclear fuel – uranium alloy with simulators of fission product (precious metals and rare earth elements) with a mass compound of Pd:Ru:Ag:Rh=25:1:3:3, Nd:Ce:La:Pr:Sm:Y=15:10:5:5:5:1).

Methods: electrorefining, X-ray fluorescence and X-ray diffraction method of analysis, inductively coupled plasma mass spectrometry, assessment of distribution of components in the system.

Results. The data obtained showed that uranium deposits have dendrite formations of alpha-uranium at 550 °C in orthorhombic crystal system toward needle cathode current density. The resulting cathode deposits are free from impurities of ruthenium, rhodium, molybdenum, praseodymium and yttrium. The purification coefficient for palladium reaches 3000, and for silver 1700. Noble metals accumulate in the anode sludge, and even with the complete depletion of the anode material. The concentration of noble metals in the cathode deposit does not exceed 0,0015 wt %. Despite the high concentration of rare-earth chlorides in the electrolyte, which simulates the accumulation of rare-earth ions during repeated reprocessing of spent nuclear fuel, the concentration of rare-earth metals in the cathode product did not exceed 0,007 wt %. During uranium electrowinning from a model spent nuclear fuel in the 3LiCl–2KCl–UCl₃ electrolyte (10,1 wt %) with REE chlorides, which imitate their accumulation in the electrolyte during repeated processing, at 550 °C, as well as the initial cathode current density of 0,2 A/cm², the specific amount of electricity is 1,0 A·h/cm². A cathode uranium deposit is released with a current efficiency exceeding 90 % with all anode mass depletion, and purification coefficient 1800 for the sum of precious metals and for the sum of rare earth metals.

Key words:

electrolytic extraction, electrorefining, cathode current density, uranium alloys, spent nuclear fuel processing, model spent nuclear fuel.

REFERENCE

- Nawada H.P., Fukuda K. Role of pyro-chemical processes in advanced fuel cycles. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 2005, vol. 66, no. 2–4, pp. 647–651.
- Driggs F.H., Lilliendahl W.C. Preparation of metal powders by electrolysis of fused salts: I-ductile uranium. *Industrial and Engineering Chemistry*, 1930, vol. 22, no. 5, pp. 516–519.
- Kolodney M. Production of plutonium by electrolysis. *Los Alamos National Laboratory Report*, 1944, LA-148.
- Kolodney M. Preparation of the first electrolytic plutonium and of uranium from fused chlorides. *Journal of The Electrochemical Society*, 1982, vol. 129, pp. 2438.
- Marzano C., Noland R.A. The electrolytic refining of uranium. *Argonne National Laboratory Report*, 1953, ANL-5102.
- Niedrach L.W., Glamm A.C. Uranium purification by electrorefining. *Journal of The Electrochemical Society*, 1956, vol. 103, no. 9, pp. 521–528.
- Boisdie G., Chauvin G., Coriou H., Hure J. Contribution a la connaissance du mecanisme de l'electroraffinage de l'uranium en bains de sels fondus [Contribution to the study of the mechanism of electrorefining of uranium in baths with molten salts]. *Electrochimica Acta*, 1961, vol. 5, no. 1–2, pp. 54–71.
- Chauvin G., Coriou H., Simenauer A. Phenomene de concentration du fer au voisinage de la cathode au cours de l'electroraffinage de l'uranium en bains de sels fondus [The phenomenon of iron concentration near the cathode during the electrorefining of uranium in baths with molten salts]. *Electrochimica Acta*, 1963, vol. 8, no. 5, pp. 323–332.
- Chauvin G., Coriou H., Jabot P., Laroche A. Production d'uranium de haute purete par electroraffinage en bains de sels fondus [Obtaining high purity uranium by electrowinning in baths with molten salts]. *Journal of Nuclear Materials*, 1964, vol. 11, no. 2, pp. 183–192.
- Kang Y.H., Lee J.H., Hwang S.C., Shim J.B., Kim E.H., Park S.W. Electrodeposition characteristics of uranium by using a graphite cathode. *Carbon*, 2006, vol. 44, pp. 3142.
- Kang Y.H., Lee J.H., Hwang S.C., Shim J.B., Kim E.H., Park S.W. Application of graphite as a cathode material for electrorefining of uranium. *Nuclear Technology*, 2008, vol. 162, pp. 135–143.
- Tomczuk Z., Ackerman J.P., Wolson R.D., Miller W.E. Uranium transport to solid electrodes in pyrochemical reprocessing of nuclear fuel. *Journal of The Electrochemical Society*, 1992, vol. 139, no. 12, pp. 3523–3528.
- Willit J.L., Miller W.E., Battles J.E. Electrorefining of uranium and plutonium – a literature review. *Journal of Nuclear Materials*, 1992, vol. 195, no. 3, pp. 229–249.
- Kuratal M., Yahagi N., Kitawaki S., Nakayoshi A., Fukushima M. Sequential electrolysis of U-Pu alloy containing a small amount of Am to recover U- and U-Pu-Am products. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 2009, vol. 46, no. 2, pp. 175–183.
- Kitawaki S., Shinozaki T., Fukushima M., Usami T., Yahagi N., Kurata M. Recovery of U-Pu alloy from MOX using a pyroprocess series. *Journal of Nuclear Materials*, 2007, vol. 162, no. 2, pp. 118–123.
- Jang J., Kim T., Kim G.-Y., Yoon D., Lee S. Uranium recovery via electrochemical deposition with a liquid zinc cathode followed by electrochemical oxidation of rare earth metals. *Journal of Nuclear Materials*, 2019, vol. 520, pp. 245–251.

17. Nikitin D.I., Zolotarev D.A., Mukhametdyanov A.D., Volkovich V.A., Polovov I.B. Uranium electrorefining in 3LiCl–2KCl based melts. *ECS Transactions*, 2020, vol. 98, no 10, pp. 443–451.
18. Nikitin D.I., Polovov I.B., Rebrin O.I. Electrorefining of uranium alloys containing palladium and neodymium in 3LiCl–2KCl–UCl₃ melts. *Melts*, 2023, no. 3, pp. 316–328. In Rus.
19. Nikitin D.I., Polovov I.B., Rebrin O.I., Shchetinsky A.V., Dedyukhin A.S. Anodic processes of uranium alloys containing palladium and neodymium in 3LiCl–2KCl–UCl₃ melts. *Melts*, 2023, no. 2, pp. 144–155. In Rus.
20. Maltsev D.S., Volkovich V.A., Vasin D.B., Vladyskin E.N. An electrochemical study of uranium behaviour in LiCl–KCl–CsCl eutectic melt. *Journal of Nuclear Materials*, 2015, no. 467, pp. 956–963.
21. Pierce R.A. Uranium metal dissolution in the presence of fluoride and boron. *U.S. Department of Commerce*, 2003, no. VA-22161, pp. 1–21.
22. Kesikopoulos V.A., Potapov A.M., Dedyukhin A.E., Zaikov Yu.P. Izgotovlenie inrtermetallida UPd₃ i issledovanie ego termodynamicheskikh harakteristik [Production of UPd₃ intermetallic and investigation of its thermodynamic characteristics]. *Elektrokhimiya v raspredelennoy i atomnoy energetike. Sbornic trudov seminarov* [Electrochemistry in distributed and nuclear power engineering: proceedings of the seminar]. Nalchik, Azhur Publ., 2022. pp. 224–226.
23. Haefling J.F., Daane A.H. The immiscibility limits of uranium with the rare-earth metals. *Transactions of the Metallurgical Society of AIME*, 1959, vol. 215, pp. 336–338.
24. Parnell D.G., Brett N.H. Phase relationship in the ternary system U–Nd–Pd. *Journal of the Less-Common Metals*, 1986, no. 118, pp. 141–152.

Received: 17 April 2023.

Reviewed: 24 April 2023.

Information about the authors

Dmitry I. Nikitin, Cand. Sc., engineer, Ural Federal University.

Ilya B. Polovov, Cand. Sc., associate professor, Ural Federal University.

Oleg I. Rebrin, Dr. Sc., professor, Ural Federal University.

УДК 621.315.2.016.2:621.313.333.2

РАЗРАБОТКА И НАСТРОЙКА НАБЛЮДАТЕЛЯ ПОЛНОГО ПОРЯДКА ДЛЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА «КАБЕЛЬНАЯ ЛИНИЯ – АСИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ»

Раков Иван Витальевич¹,
rakovivan@live.com

Глазырин Александр Савельевич^{2,3},
asglazyrin@tpu.ru

Кладиев Сергей Николаевич²,
kladiev@tpu.ru

¹ ООО «Газпром трансгаз Томск»,
Россия, 634029, г. Томск, пр. Фрунзе, 9.

² Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

³ Югорский государственный университет,
Россия, 628012, г. Ханты-Мансийск, ул. Чехова, 16.

Актуальность. В связи с тем, что запасы нефти, не требующие для своей добычи высоких энергозатрат, снижаются, количество фонтанирующих скважин становится меньше, а обводненность добываемого флюида увеличивается, перед специалистами нефтедобывающих компаний встает задача – максимально уменьшить все виды энергозатрат, обеспечив повышение рентабельности добычи нефти. Одним из методов снижения энергетических затрат при добыче нефти из низко- и среднедебитных скважин является перевод скважины, оборудованной установкой электроцентробежного насоса, с режима непрерывной эксплуатации на режим периодической эксплуатации скважины и в частности ее подтипа – циклической эксплуатации скважины, которая характеризуется чередованием кратковременных периодов извлечения (до 15 минут) и накопления (до 30 минут) нефти на забое скважины. При переводе скважины на циклическую эксплуатацию происходит снижение потребления электроэнергии погружным электродвигателем до 40 % и увеличение добычи нефти до 3 % за счет частичной гравитационной сепарации добываемого флюида на этапе накопления. В свою очередь, негативным эффектом от перевода скважины на циклическую эксплуатацию является уменьшение среднего срока наработки на отказ из-за увеличения бросков тока и момента при интенсивном разгоне вала погружного электродвигателя до номинальной скорости. Решением данных проблем будет переход от разомкнутой скалярной к векторной бездатчиковой системе управления. Для реализации векторной системы управления необходимо получить информацию о переменных состоянии погружного электродвигателя. Учитывая основные достоинства и недостатки прямого измерения и косвенного оценивания переменных состояния, перспективным способом получения информации можно считать построение наблюдателя полного порядка на основе явных математических моделей. На основании вышеизложенного разработка наблюдателя полного порядка электротехнического комплекса «кабельная линия – асинхронный двигатель», а также методики его настройки является актуальной задачей, решение которой позволит создать предпосылки для реализации векторной системы управления погружным электродвигателем.

Цель: разработать и экспериментально подтвердить работоспособность наблюдателя полного порядка для электротехнического комплекса «кабельная линия – асинхронный двигатель».

Методы: анализ литературных источников, системный анализ, математическое моделирование, экспериментальное исследование.

Результаты. Была проведена разработка и экспериментальное испытание наблюдателя полного порядка для электротехнического комплекса «кабельная линия – асинхронный двигатель». Результаты данного исследования подтверждают работоспособность наблюдателя и возможность его применения для реализации векторной системы управления погружным электродвигателем.

Ключевые слова:

наблюдатель полного порядка, электротехнический комплекс, кабельная линия, асинхронный двигатель, экспериментальное тестирование, методика настройки наблюдателя, генетический алгоритм, настройка наблюдателя, система управления, УЭЦН, циклическая эксплуатация скважины, периодическая эксплуатация скважины, средний срок наработки на отказ, низко- и среднедебитные скважины, стохастический характер потребления электрической энергии.

Введение

При переводе скважины на режим циклической эксплуатации (ЦЭС) теоретически [1–7] и экспериментально [8–10] подтверждено уменьшение потребления электроэнергии (до 40 %) и увеличение добычи нефти (до 3 %). Однако перевод на ЦЭС также сопро-

вождается негативными эффектами, такими как: уменьшение ресурса гидрозащиты установки электроцентробежного насоса (УЭЦН), ускоренный износ шайб в компоновке центробежного насоса, промежуточных радиальных и упорных подшипников [8]. При изменении режима работы средний срок

наработки на отказ компонентов подземного оборудования снижается практически в 2 раза [8], т. е. перевод в большом объеме скважин на ЦЭС приведет к повышению количества вышедших из строя погружных электродвигателей (ПЭД) и компонентов насоса в ограниченный промежуток времени, а это может нивелировать полученные положительные эффекты от экономии электроэнергии и увеличения количества добытой нефти за счет расхода средств на ремонт подземного оборудования УЭЦН. Причиной негативных эффектов при переводе на технологию ЦЭС является уменьшение времени разгона ротора ПЭД до установившейся скорости вращения с нескольких десятков минут до нескольких десятков секунд, что вызывает броски тока и момента при разгоне и, как следствие, повышенный уровень вибрации всей подземной компоновки УЭЦН [8].

Перспективный способ борьбы с бросками тока и момента в переходном режиме – это разработка и внедрение векторной системы управления электроцентробежным насосом [11–19]. Для реализации этой системы необходимо получить информацию о состоянии ПЭД. Один из методов получения информации, который позволяет оценивать переменные состояния без изменения и доработки подземной части оборудования УЭЦН – создание наблюдателей полного порядка переменных состояния электротехнической подсистемы УЭЦН на основе явных математических моделей. Для разработки наблюдателя переменных состояний ПЭД необходимо составить математические модели каждого электротехнического компонента, входящего в силовую электрическую цепь УЭЦН, а именно «преобразователь частоты (ПЧ) – синус-фильтр (СФ) – повышающий трансформатор (ПТ) – нефтепогружной кабель (НПК) – погружной электродвигатель (ПЭД)», затем объединить каждую отдельную модель в общую систему [20]. Однако если обеспечить измерение токов и напряжений на выходе ПТ, входе НПК, то достаточно будет составить только математические модели НПК и ПЭД, а затем объединить их в общую систему, получив таким образом в обобщенном случае математическую модель «кабельная линия – асинхронный двигатель».

При реализации наблюдателя также необходимо учитывать основные возмущающие воздействия, которые присутствуют при эксплуатации УЭЦН, а именно: изменение температуры затрубного и внутритрубного пространства насосно-компрессорной трубы (НКТ) при различных режимах работы УЭЦН, изменение состава добываемого флюида, появление асфальтосмолопарафиновых отложений на внутренних стенках НКТ, задавая стохастический характер потребления электрической энергии. Перечисленные возмущающие воздействия приводят к тому, что в процессе работы параметры подземной электротехнической системы будут меняться со временем. Это, в свою очередь, приводит к тому, что при разработке наблюдателя необходимо обеспечить его параметрическую робастность.

Таким образом, создание наблюдателя полного порядка для электротехнического комплекса «кабельная линия – асинхронный двигатель» с параметрической робастностью является своевременной и актуальной задачей.

Математическое описание разработанного наблюдателя полного порядка электротехнического комплекса «кабельная линия – асинхронный двигатель»

Математическое описание разработанного наблюдателя переменных состояния исследуемого комплекса представлено в виде системы дифференциальных уравнений (1), в котором количество переменных состояния может варьироваться в зависимости от длины кабельной линии и частоты питающей сети [20]. Допущения при составлении математического ядра наблюдателя указаны в работах [20, 21].

При моделировании кабельной линии были приняты следующие допущения и упрощения: в модели рассматривается нефтепогружной кабель круглого сечения, представляющий собой однородную длинную линию; в рассматриваемом диапазоне температур изменение электрофизических свойств материалов кабеля пренебрежимо мало и их значения принимаются постоянными; влияние брони на индуктивность жил кабеля пренебрежимо мало и не учитывается; геометрические размеры конструктивных элементов нефтепогружного кабеля и взаимное расположение изолированных токопроводящих жил принимаются постоянными по всей длине; вихревые токи в экранах и эффект вытеснения тока в основных проводниках (эффект близости) не учитывается в рассматриваемом диапазоне частот; стальная броня кабеля заземлена и выполняет функцию экрана, в связи с чем магнитное влияние колонны НКТ не учитывается; не учитываются потери в металле и эффект насыщения; на характеристики нефтепогружного кабеля не влияют электротехнические компоненты, находящиеся в силовом канале УЭЦН [20].

При моделировании асинхронного двигателя (АД) были приняты следующие допущения и упрощения: магнитная система линейная; отсутствуют потери в стали, вызванные вихревыми токами и явлениями гистерезиса; отсутствует эффект вытеснения тока; обмотки статора и ротора считаются симметричными; воздушный зазор равномерный; изменение магнитной проводимости, обусловленное наличием пазов статора и ротора, не учитывается; распространение магнитных полей равномерное и синусоидальное [21].

На основании методологии исследования, приведенной в работе [20], а также для удобства расчета при частоте питания 50 Гц количество звеньев редуцированной математической модели кабельной линии нужно указывать из расчета 1 звено на 1 километр кабельной линии. При длине кабельной линии в 3,5 км количество звеньев будет равняться четырем, при 4,2 км – 5 звеньев и т. д.

$$\begin{aligned}
 & \frac{d\hat{i}_{1\alpha_каб}(t)}{dt} = \frac{\left(u_{\alpha_вх}(t) - \hat{i}_{1\alpha_каб}(t) \cdot R_{каб} / n - \hat{u}_{1\alpha_вых}(t) + k_1 \cdot (R_{каб} + R_3) \cdot (\hat{i}_{\alpha_каб}(t) - \hat{i}_{1\alpha_каб}(t)) \right)}{L_{каб} / n} \\
 & \frac{d\hat{i}_{1\beta_каб}(t)}{dt} = \frac{\left(u_{\beta_вх}(t) - \hat{i}_{1\beta_каб}(t) \cdot R_{каб} / n - \hat{u}_{1\beta_вых}(t) + k_1 \cdot (R_{каб} + R_3) \cdot (\hat{i}_{\beta_каб}(t) - \hat{i}_{1\beta_каб}(t)) \right)}{L_{каб} / n} \\
 & \frac{d\hat{u}_{1\alpha_вых}(t)}{dt} = \frac{(\hat{i}_{1\alpha_каб}(t) - \hat{u}_{1\alpha_вых}(t) \cdot G_{каб} / n - \hat{i}_{2\alpha_каб}(t))}{C_{каб} / n} \\
 & \frac{d\hat{u}_{1\beta_вых}(t)}{dt} = \frac{(\hat{i}_{1\beta_каб}(t) - \hat{u}_{1\beta_вых}(t) \cdot G_{каб} / n - \hat{i}_{2\beta_каб}(t))}{C_{каб} / n} \\
 & \vdots \\
 & \frac{d\hat{i}_{(n)\alpha_каб}(t)}{dt} = \frac{(\hat{u}_{(n-1)\alpha_вых}(t) - \hat{i}_{(n)\alpha_каб}(t) \cdot R_{каб} / n - \hat{u}_{(n)\alpha_вых}(t))}{L_{каб} / n} \\
 & \frac{d\hat{i}_{(n)\beta_каб}(t)}{dt} = \frac{(\hat{u}_{(n-1)\beta_вых}(t) - \hat{i}_{(n)\beta_каб}(t) \cdot R_{каб} / n - \hat{u}_{(n)\beta_вых}(t))}{L_{каб} / n} \\
 & \frac{d\hat{u}_{(n)\alpha_вых}(t)}{dt} = \frac{(\hat{i}_{(n)\alpha_каб}(t) - \hat{u}_{(n)\alpha_вых}(t) \cdot G_{каб} / n - \hat{i}_{1\alpha}(t))}{C_{каб} / n} \\
 & \frac{d\hat{u}_{(n)\beta_вых}(t)}{dt} = \frac{(\hat{i}_{(n)\beta_каб}(t) - \hat{u}_{(n)\beta_вых}(t) \cdot G_{каб} / n - \hat{i}_{1\beta}(t))}{C_{каб} / n} \\
 & \frac{d\hat{u}_{\alpha_доб}(t)}{dt} = \frac{(R_{каб} + R_3) \cdot (\hat{i}_{\alpha_каб}(t) - \hat{i}_{1\alpha_каб}(t))}{k_2} \\
 & \frac{d\hat{u}_{\beta_доб}(t)}{dt} = \frac{(R_{каб} + R_3) \cdot (\hat{i}_{\beta_каб}(t) - \hat{i}_{1\beta_каб}(t))}{k_2} \\
 & \frac{d\hat{i}_{1\alpha}(t)}{dt} = \frac{1}{\sigma \cdot L_1} \cdot \hat{u}_{(n)\alpha_вых}(t) - \frac{R_3}{\sigma \cdot L_1} \cdot \hat{i}_{1\alpha}(t) + \frac{R'_2 \cdot L_m}{\sigma \cdot L_1 \cdot L_2^2} \cdot \hat{\Psi}_{2\alpha}(t) + \\
 & \quad + \frac{L_m}{\sigma \cdot L_1 \cdot L_2} \cdot z_p \cdot \hat{\omega}(t) \cdot \hat{\Psi}_{2\beta}(t) + \hat{u}_{\alpha_доб}(t) \\
 & \frac{d\hat{i}_{1\beta}(t)}{dt} = \frac{1}{\sigma \cdot L_1} \cdot \hat{u}_{(n)\beta_вых}(t) - \frac{R_3}{\sigma \cdot L_1} \cdot \hat{i}_{1\beta}(t) + \frac{R'_2 \cdot L_m}{\sigma \cdot L_1 \cdot L_2^2} \cdot \hat{\Psi}_{2\beta}(t) - \\
 & \quad - \frac{L_m}{\sigma \cdot L_1 \cdot L_2} \cdot z_p \cdot \hat{\omega}(t) \cdot \hat{\Psi}_{2\alpha}(t) + \hat{u}_{\beta_доб}(t) \\
 & \frac{d\hat{\Psi}_{2\alpha}(t)}{dt} = -\frac{R'_2}{L_2} \cdot \hat{\Psi}_{2\alpha}(t) + \frac{R'_2 \cdot L_m}{L_2} \cdot \hat{i}_{1\alpha}(t) - z_p \cdot \hat{\omega}(t) \cdot \hat{\Psi}_{2\beta}(t) \\
 & \frac{d\hat{\Psi}_{2\beta}(t)}{dt} = -\frac{R'_2}{L_2} \cdot \hat{\Psi}_{2\beta}(t) + \frac{R'_2 \cdot L_m}{L_2} \cdot \hat{i}_{1\beta}(t) + z_p \cdot \hat{\omega}(t) \cdot \hat{\Psi}_{2\alpha}(t) \\
 & \hat{M}_{эм}(t) = \frac{3}{2} \cdot \frac{L_m}{L_2} \cdot z_p \cdot (\hat{\Psi}_{2\alpha}(t) \cdot \hat{i}_{1\beta}(t) - \hat{\Psi}_{2\beta}(t) \cdot \hat{i}_{1\alpha}(t)) \\
 & \frac{d\hat{M}_c(t)}{dt} = \left(\frac{1}{k_4 \cdot T_2} \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{L_m}{L_2} \cdot z_p + \frac{3}{2} \cdot \frac{L_m}{L_2} \cdot z_p \cdot k_3 \right) \cdot \\
 & \quad \cdot \left(\hat{\Psi}_{2\alpha}(t) \cdot (\hat{i}_{\beta_каб}(t) - \hat{i}_{1\beta_каб}(t)) - \hat{\Psi}_{2\beta}(t) \cdot (\hat{i}_{\alpha_каб}(t) - \hat{i}_{1\alpha_каб}(t)) \right); \\
 & \frac{d\hat{\omega}(t)}{dt} = \frac{1}{J} \cdot (\hat{M}_{эм}(t) - \hat{M}_c(t)),
 \end{aligned} \tag{1}$$

где $u_{\alpha_вх}(t)$ – проекция вектора входного измеренного напряжения в момент времени t по оси α ; $u_{\beta_вх}(t)$ – проекция вектора входного измеренного напряжения

в момент времени t по оси β ; $i_{\alpha_каб}(t)$ – проекция вектора измеренного тока на входе кабельной линии в момент времени t по оси α ; $i_{\beta_каб}(t)$ – проекция вектора измеренного тока на входе кабельной линии в момент времени t по оси β ; $\hat{i}_{(n)\alpha_каб}(t)$ – оценка состояния вектора тока в кабеле в звене n в момент времени t по оси α ; $\hat{i}_{(n)\beta_каб}(t)$ – оценка состояния вектора тока в кабеле в звене n в момент времени t по оси β ; $\hat{u}_{(n)\alpha_вых}(t)$ – оценка состояния вектора выходного напряжения кабеля в звене n в момент времени t по оси α ; $\hat{u}_{(n)\beta_вых}(t)$ – оценка состояния вектора выходного напряжения кабеля в звене n в момент времени t по оси β ; $\hat{i}_{1\alpha}(t)$ – оценка состояния вектора тока статора в момент времени t по оси α ; $\hat{i}_{1\beta}(t)$ – оценка состояния вектора тока статора в момент времени t по оси β ; $\hat{\Psi}_{2\alpha}(t)$ – оценка состояния вектора потокосцепления ротора в момент времени t по оси α ; $\hat{\Psi}_{2\beta}(t)$ – оценка состояния вектора потокосцепления ротора в момент времени t по оси β ; $\hat{M}_{эм}(t)$ – оценка состояния электромагнитного момента АД; $\hat{M}_c(t)$ – оценка состояния момента сопротивления на валу АД; $\hat{\omega}(t)$ – оценка угловой скорости вращения ротора АД; $R_{каб}$ – сопротивление токоведущих жил; $L_{каб}$ – индуктивность токоведущих жил; $C_{каб}$ – эквивалентная ёмкость фазы относительно двух других фаз и брони; $G_{каб}$ – проводимость изоляции; $L_1 = L_{1\sigma} + L_m$ – эквивалентная индуктивность обмотки статора; $L'_2 = L'_{2\sigma} + L_m$ – эквивалентная индуктивность обмотки ротора; $\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_1 \cdot L'_{2\sigma}}$ – коэффициент рассеяния; $R_3 = R_1 + \frac{R'_2 \cdot L_m}{L'_{2\sigma}}$ – эквивалентное активное сопротивление цепей статора; R_1 – сопротивление обмотки статора; R'_2 – приведенное к статору сопротивление обмотки ротора; $L_{1\sigma}$ – индуктивность рассеяния обмотки статора; $L'_{2\sigma}$ – приведенная к статору индуктивность рассеяния обмотки ротора; J – момент инерции одномассовой механической системы электропривода; z_p – число пар полюсов; k_1, k_2, k_3, k_4 – масштабированные коэффициенты.

Методика настройки наблюдателя полного порядка для электротехнического комплекса «кабельная линия – асинхронный двигатель» на основе баланса потребляемой мощности

Первоначально для разработки методики настройки масштабированных коэффициентов наблюдателя в качестве объекта исследования был принят двигатель постоянного тока с независимым возбуждением (ДПТ НВ) из-за своего простого математического описания. Был реализован наблюдатель полного порядка ДПТ НВ и настроен по известной методике [22], после чего проведено исследование влияния изменения параметров схемы замещения ДПТ НВ в математическом ядре наблюдателя на ошибку оценивания угловой скорости вращения вала ДПТ НВ по формуле (2)

$$\varepsilon_{\omega} = \frac{\int_0^t |\omega(t) - \hat{\omega}(t, k_1, k_2, \dots, k_n)| dt}{\int_0^t |\omega(t)| dt} \cdot 100, \tag{2}$$

где $\omega(t)$ – угловая скорость вращения вала двигателя; $\hat{\omega}(t, k_1, k_2, \dots, k_n)$ – оценка угловой скорости вращения вала двигателя; $t, k_1, k_2, \dots, k_n$ – значения масштабирующих коэффициентов наблюдателя.

График зависимости ошибки оценивания наблюдателем полного порядка угловой скорости вращения вала ДПТ НВ при изменении электрических параметров схемы замещения ДПТ НВ в математическом ядре наблюдателя представлен на рис. 1 (не закрашенная поверхность). В результате исследования отмечено, что при уменьшении электрических параметров схемы замещения ошибка оценивания угловой скорости вращения возрастает в большей степени, чем при увеличении параметров.

На основании анализа поверхности (рис. 1) (не закрашенная) была выдвинута гипотеза о том, что наблюдатель, заведомо настроенный относительно заниженных параметров схемы замещения исследуемой системы, будет более точно оценивать угловую скорость вращения при изменении электрических параметров системы. Гипотеза была проверена, наблюдатель ДПТ НВ настроен с помощью генетического алгоритма на заведомо заниженных параметрах схемы замещения ДПТ НВ, после чего повторно вычислена ошибка оценивания (2) в зависимости от изменения электрических параметров схемы замещения ДПТ НВ (цветная поверхность) (рис. 1).

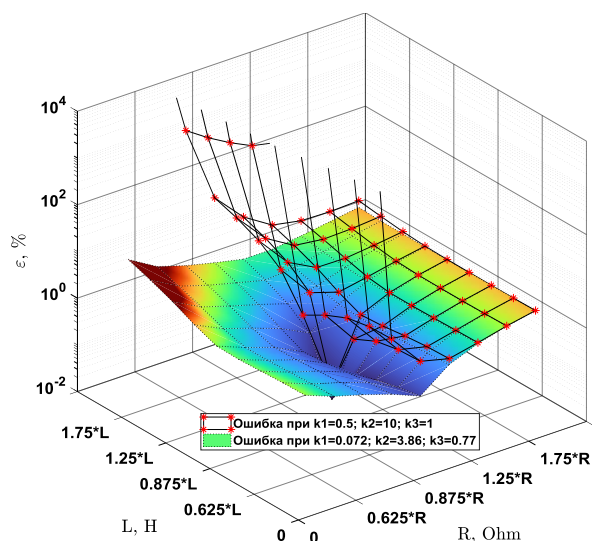


Рис. 1. График зависимости ошибки оценивания наблюдателем полного порядка угловой скорости вращения вала ДПТ НВ при изменении параметров наблюдателя при масштабирующих коэффициентах $k_1 = 0,5$, $k_2 = 10$, $k_3 = 1$ и $k_1 = 0,072$, $k_2 = 3,86$, $k_3 = 0,77$

Fig. 1. Graph of an error in the observer estimation of a full order of direct current motor rotation angular velocity depending on the change in the observer parameters with scaling factors $k_1 = 0,5$, $k_2 = 10$, $k_3 = 1$ and $k_1 = 0,072$, $k_2 = 3,86$, $k_3 = 0,77$

При заново настроенных масштабирующих коэффициентах наблюдателя ошибка оценивания угловой скорости вращения вала ДПТ НВ на исследуемом диапазоне изменения электрических параметров схе-

мы замещения не превышает 3,5 %, что является приемлемым результатом, подтверждает выдвинутую гипотезу и обеспечивает параметрическую робастность настроенного наблюдателя.

Проведя анализ и интерпретацию представленных результатов и результатов промежуточных исследований, была разработана методика настройки масштабирующих коэффициентов наблюдателя полного порядка вектора переменных состояний электротехнического комплекса «кабельная линия – асинхронный двигатель» на основе баланса потребляемой мощности для обеспечения повышенной параметрической робастности. Потребляемая полная мощность принята в качестве критерия настройки наблюдателя – во-первых, потому, что при изменении какого-либо электрического параметра в электротехническом комплексе изменится потребляемая им активная, реактивная и полная мощность, а так как параметры в настраиваемой математической модели не изменяются, возникает невязка между показаниями потребляемой мощности объекта исследования и ее оценкой [21]. Во-вторых, потребляемая полная мощность содержит в себе информацию о всех входных воздействиях и откликах объекта исследования, что отсекает необходимость дальнейшего выбора критерия настройки наблюдателя.

Основные этапы методики:

- 1) произвести процедуру оценивания параметров схемы замещения (рис. 2) электротехнического комплекса «кабельная линия – асинхронный двигатель»;
- 2) ввести оцененные параметры в разработанный наблюдатель (1) и снизить их в 0,9 раз;
- 3) сформировать функционал ошибки на основе модуля разности между вычисленной полной потребляемой электротехническим комплексом «кабельная линия – асинхронный двигатель» мощностью и ее оценкой наблюдателем;
- 4) используя генетический алгоритм [21], минимизировать функционал ошибки и определить масштабирующие коэффициенты наблюдателя;
- 5) ввести найденные масштабирующие коэффициенты в наблюдатель (1) и вернуть оцененные параметры схемы замещения электротехнического комплекса «кабельная линия – асинхронный двигатель» к номинальным значениям;
- 6) контролировать невязку между вычисленной и оцененной полной потребляемой мощностью. Если ошибка оценивания полной потребляемой мощности более чем 25 %, произвести повторную оценку параметров схемы замещения электротехнического комплекса «кабельная линия – асинхронный двигатель» и ввести их в наблюдатель (1).

Процедура настройки наблюдателя полного порядка на основе баланса потребляемой мощности

Схема процедуры настройки наблюдателя полного порядка на основе баланса потребляемой мощности приведена на рис. 3.

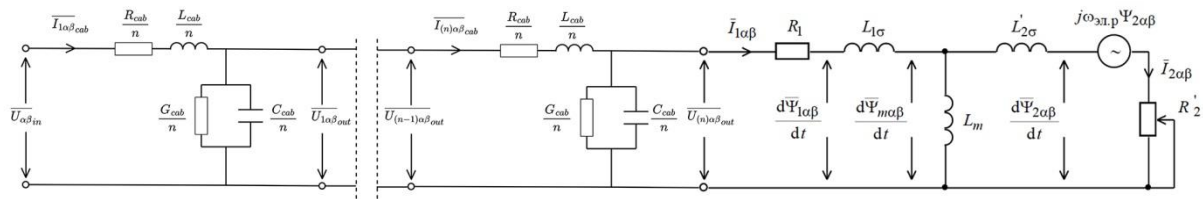


Рис. 2. Схема замещения электротехнического комплекса «кабельная линия – асинхронный двигатель» с редуцированной математической моделью кабельной линии

Fig. 2. Replacement scheme of the electrical complex «cable line – induction motor» with a reduced model of a cable line

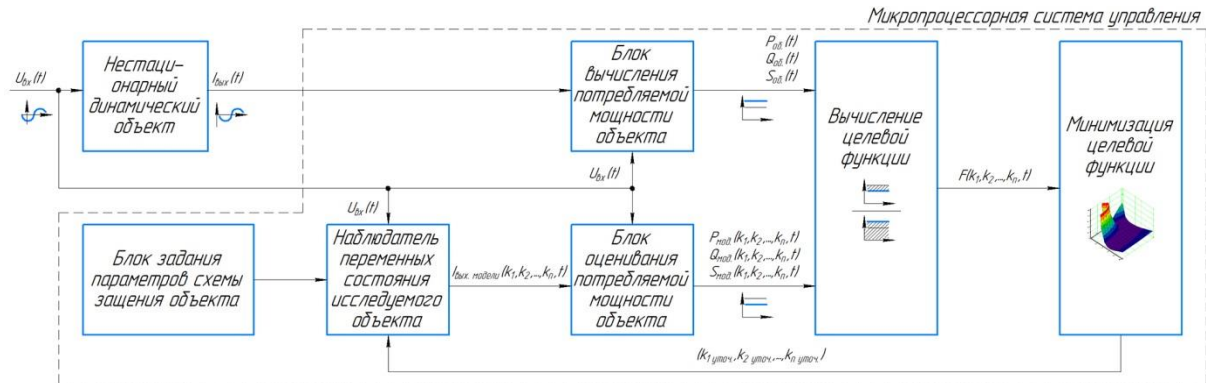


Рис. 3. Схема процедуры настройки масштабирующих коэффициентов наблюдателя полного порядка на основе баланса потребляемой мощности

Fig. 3. Scheme of adjusting scaling factors of a full-order observer based on power consumption balance

Основной алгоритм действий по настройке масштабирующих коэффициентов наблюдателя заключается в том, что на нестационарный динамический объект подается входное напряжение, откликом объекта является ток. Записанные значения тока и напряжения передаются в микропроцессорную систему управления. После этого на наблюдатель полного порядка вектора переменных состояния подается входное воздействие в виде значений зафиксированного ранее напряжения, откликом наблюдателя является оценка потребляемого нестационарным объектом тока. После того как зафиксировано напряжение, получен отклик объекта и оценка отклика наблюдателем, данные передаются на блоки вычисления и оценивания потребляемой полной мощности объекта [21]. Для вычисления активной и реактивной потребляемой мощности объекта исследования без использования фазометра необходимо перевести зафиксированное напряжение и токи из трехфазной системы в двухфазную $\alpha\beta$ по формуле (3).

$$\begin{aligned} U_\alpha(t) &= U_A(t); \\ U_\beta(t) &= \frac{U_B(t) - U_C(t)}{\sqrt{3}}; \\ I_\alpha(t) &= I_A(t); \\ I_\beta(t) &= \frac{I_B(t) - I_C(t)}{\sqrt{3}}, \end{aligned} \quad (3)$$

где $I_\alpha(t)$ – проекция результирующего вектора тока по оси α ; $U_\alpha(t)$ – проекция вектора входного измеренного напряжения по оси α ; $I_\beta(t)$ – проекция результирующего вектора тока по оси β ; $U_\beta(t)$ – проекция вектора входного измеренного напряжения по оси β .

Затем путем скалярного и векторного [21] произведения масштабированных векторов для объекта исследования $\bar{I}\left(\frac{I_\alpha(t)}{\sqrt{2}}, \frac{I_\beta(t)}{\sqrt{2}}\right) \bar{U}\left(\frac{U_\alpha(t)}{\sqrt{2}}, \frac{U_\beta(t)}{\sqrt{2}}\right)$, для модели объекта исследования $\bar{I}\left(\frac{\hat{I}_\alpha(t, \hat{k}_1, \hat{k}_2, \dots, \hat{k}_n)}{\sqrt{2}}, \frac{\hat{I}_\beta(t, \hat{k}_1, \hat{k}_2, \dots, \hat{k}_n)}{\sqrt{2}}\right) \bar{U}\left(\frac{U_\alpha(t)}{\sqrt{2}}, \frac{U_\beta(t)}{\sqrt{2}}\right)$, заданных координатами в ортогональном базисе, необходимо вычислить активную (4) и реактивную мощность (5), соответственно, после чего вычисляется полная мощность (6)

$$\begin{aligned} \hat{P}_{\alpha\beta}(t, \hat{k}_1, \hat{k}_2, \dots, \hat{k}_n) &= \\ &= m \left(\frac{\hat{I}_\alpha(t, \hat{k}_1, \hat{k}_2, \dots, \hat{k}_n)}{\sqrt{2}} \cdot \frac{U_\alpha(t)}{\sqrt{2}} + \frac{\hat{I}_\beta(t, \hat{k}_1, \hat{k}_2, \dots, \hat{k}_n)}{\sqrt{2}} \cdot \frac{U_\beta(t)}{\sqrt{2}} \right); \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \hat{Q}_{\alpha\beta}(t, \hat{k}_1, \hat{k}_2, \dots, \hat{k}_n) &= \\ &= m \left(\frac{\hat{I}_\alpha(t, \hat{k}_1, \hat{k}_2, \dots, \hat{k}_n)}{\sqrt{2}} \cdot \frac{U_\beta(t)}{\sqrt{2}} - \frac{\hat{I}_\beta(t, \hat{k}_1, \hat{k}_2, \dots, \hat{k}_n)}{\sqrt{2}} \cdot \frac{U_\alpha(t)}{\sqrt{2}} \right); \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \hat{S}_{\alpha\beta}(t, \hat{k}_1, \hat{k}_2, \dots, \hat{k}_n) &= \\ &= \sqrt{\left(\hat{P}_{\alpha\beta}(t, \hat{k}_1, \hat{k}_2, \dots, \hat{k}_n)\right)^2 + \left(\hat{Q}_{\alpha\beta}(t, \hat{k}_1, \hat{k}_2, \dots, \hat{k}_n)\right)^2}, \end{aligned} \quad (6)$$

где m – количество фаз, ед.

Следующим шагом вычисляется невязка между вычисленной и оцененной полной потребляемой мощностью объекта. Для описания невязки между экспериментальными и модельными значениями составляется целевая функция с позиции метода наименьших модулей. Обобщенная запись целевой функции представлена в (7)

$$\begin{aligned} F(t, \hat{k}_1, \hat{k}_2, \dots, \hat{k}_n) &= \\ &= \int_0^t |S(t) - \hat{S}_{\alpha\beta}(t, \hat{k}_1, \hat{k}_2, \dots, \hat{k}_n)| dt, \end{aligned} \quad (7)$$

(табл. 1), регулируемого источника постоянного напряжения и датчика угловой скорости вращения.

Таблица 1. Параметры экспериментального АД и двигателя постоянного тока с независимым возбуждением

Table 1. Parameters of an experimental induction motor and a separately excited direct current (DC) motor with independent excitation

Параметры асинхронного двигателя/Induction motor parameters					
$P_{\text{ном}}, \text{Вт}$ $P_{\text{пот}}, \text{W}$	$n_{\text{синх}}, \text{об/мин}$ n_{synch} rpm/min	$n_{\text{ном}}, \text{об/мин}$ n_{nom} rpm/min	$I_{\text{ном}}, \text{А}$ I_{nom}, A	$\eta_{\text{ном}}, \%$ $\eta_{\text{nom}}, \%$	$\cos \varphi_{\text{ном}}, \text{о.е.}$ $\cos \varphi_{\text{nom}}, \text{p.u.}$
30	1500	1250	0,35	36	0,73
Параметры двигателя постоянного тока/DC Motor Parameters					
$P_{\text{ном}}, \text{Вт}$ $P_{\text{пот}}, \text{W}$	$n_{\text{синх}}, \text{об/мин}$ n_{synch} rpm/min	$U_{\text{ном}}, \text{В}$ U_{nom}, V	$I_{\text{ном}}, \text{А}$ I_{nom}, A	$\eta_{\text{ном}}, \%$ $\eta_{\text{nom}}, \%$	$U_{\text{возб}}, \text{В}$ U_{exc}, V
90	1500	220	0,56	57,2	220

Блок датчиков токов и напряжений содержит три измерительных преобразователя «ток–напряжение» типа HMS 20-P и три измерительных преобразователя «напряжение–напряжение» типа LV 25-1000. Плата сбора данных использовалась PCI 6024E компании National Instruments. Информация о метрологических характеристиках датчиков и платы сбора данных представлена в [21].

Параметры схемы замещения экспериментальной установки представлены в табл. 2.

В результате проведения эксперимента были получены мгновенные значения токов, напряжений и угловой скорости вращения в режимах работы пуск под нагрузкой/наброс дополнительной нагрузки/сброс дополнительной нагрузки/реверс/останов (рис. 5).

После проведения эксперимента и фиксации данных был произведен перевод экспериментальных трехфазных мгновенных значений напряжения и тока в двухфазную систему координат $\alpha\beta$ (3), а затем выполнен расчет потребляемой активной, реактивной и полной мощности (4)–(6).

Таблица 2. Оцененные параметры схемы замещения экспериментального электротехнического комплекса «кабельная линия – асинхронный двигатель»

Table 2. Estimated parameters of the conversion scheme of the experimental electrical complex «cable line – induction motor»

Параметр/Parameter	Оцененное значение/Estimated value
$\hat{R}_{каб}, Ом/\Omega$	118,94
$\hat{L}_{каб}, Гн/Н$	0,60
$\hat{C}_{каб}, мкФ/\mu F$	0,32
$\hat{C}_{каб}, мкСм/\mu\Omega^{-1}$	36,78
$\hat{R}_1, Ом/\Omega$	39,77
$\hat{L}_{1\delta}, Гн/Н$	0,04
$\hat{L}_m, Гн/Н$	0,50
$\hat{R}'_2, Ом/\Omega$	46,69
$\hat{J}, кг \cdot м^2/kg \cdot m^2$	0,01

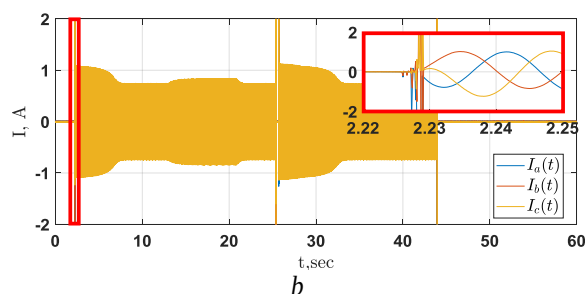
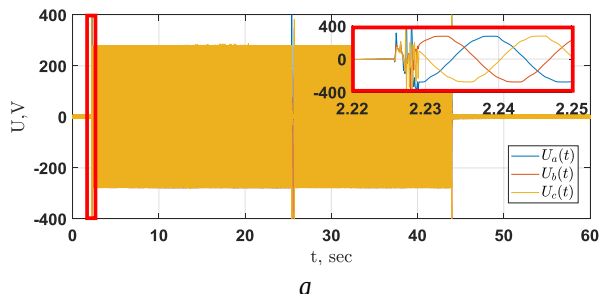


Рис. 5. Экспериментальные значения напряжения (а) и тока (б) в режимах работы пуск под нагрузкой/наброс дополнительной нагрузки/сброс дополнительной нагрузки/реверс/останов

Fig. 5. Experimental values of voltage (a) and current (b) in operating modes: start/load surge/load dump/reverse/stop

Результаты расчетов

После вычисления экспериментального значения потребляемой полной мощности и первоначальной оценки потребляемой мощности наблюдателем электротехнического комплекса «кабельная линия – асинхронный двигатель» была сформирована целевая функция (8)

$$F(t, \hat{k}_1, \hat{k}_2, \hat{k}_3, \hat{k}_4) = \int_0^t |S(t) - S_{\alpha\beta}(t, \hat{k}_1, \hat{k}_2, \hat{k}_3, \hat{k}_4)| dt, \quad (8)$$

где $S(t)$ – полная потребляемая мощность электротехнического комплекса «кабельная линия – асинхронный двигатель»; $S_{\alpha\beta}(t, \hat{k}_1, \hat{k}_2, \dots, \hat{k}_n)$ – оценка полной потребляемой мощности электротехнического комплекса «кабельная линия – асинхронный двига-

тель»; $\hat{k}_1, \hat{k}_2, \hat{k}_3, \hat{k}_4$ – искомые значения масштабирующих коэффициентов наблюдателя электротехнического комплекса «кабельная линия – асинхронный двигатель».

Затем проведена оптимизация целевой функции с помощью генетического алгоритма. В результате процесса минимизации целевой функции (8) был получен итерационный процесс процедуры минимизации (рис. 6).

Сведем оцененные значения масштабирующих коэффициентов k_1, k_2, k_3, k_4 в табл. 3 и вычислим ошибку оценивания сигнала угловой скорости вращения (2).

Проследим на рис. 7, как оценивается сигнал угловой скорости вращения ротора АД при использовании найденных масштабирующих коэффициентов.

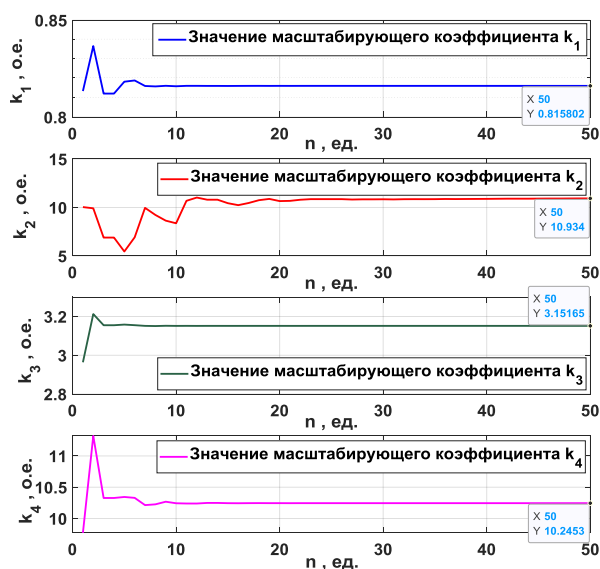


Рис. 6. Итерационный процесс минимизации целевой функции для определения значений масштабирующих коэффициентов наблюдателя полного порядка электротехнического комплекса «кабельная линия – асинхронный двигатель»

Fig. 6. Iterative process of minimizing the objective function for determining the values of scaling coefficients of the observer of the full order of the electrical complex «cable line – induction motor»

Для проверки гипотезы параметрической робастности настроенного наблюдателя был проведен полный факторный анализ 256 комбинаций электрических параметров схемы замещения экспериментального электротехнического комплекса «кабельная линия – асинхронный двигатель» в диапазоне измене-

ния от 0,9 до 1,1 номинальных значений электрических параметров. Основные результаты представлены в табл. 4 и на рис. 8. Ошибка оценивания угловой скорости вращения вычислялась по (2). Ошибка оценивания полной потребляемой мощности вычислялась по (9).

$$\varepsilon_S = \frac{\int_0^t |S(t) - \hat{S}_{\alpha\beta}(t, k_1, k_2, k_3, k_4)| dt}{\int_0^t |S(t)| dt} \cdot 100, \quad (9)$$

где $S(t)$ – полная потребляемая мощность электротехнического комплекса «кабельная линия – асинхронный двигатель»; $\hat{S}_{\alpha\beta}(t, k_1, k_2, k_3, k_4)$ – оценка полной потребляемой мощности электротехнического комплекса «кабельная линия – асинхронный двигатель»; k_1, k_2, k_3, k_4 – найденные значения масштабирующих коэффициентов наблюдателя электротехнического комплекса «кабельная линия – асинхронный двигатель».

Таблица 3. Значения масштабирующих коэффициентов наблюдателя полного порядка и ошибка оценивания наблюдателем угловой скорости вращения ротора АД при найденных коэффициентах

Table 3. Values of scaling coefficients of the full order observer and an error in the observer estimation of IM rotor rotation angular velocity with the found coefficients

Масштабирующий коэффициент, о.е. Scale factor, p.u.	Значение Value	Ошибка оценивания угловой скорости вращения Error in estimating rotation angular velocity	Значение Value
k_1	0,815	$\varepsilon_{\omega}, \%$	11,37
k_2	10,934		
k_3	3,151		
k_4	10,245	$\varepsilon_{\omega}, \%$ на участке 5–25 с at the work site 5–25 sec	4,51

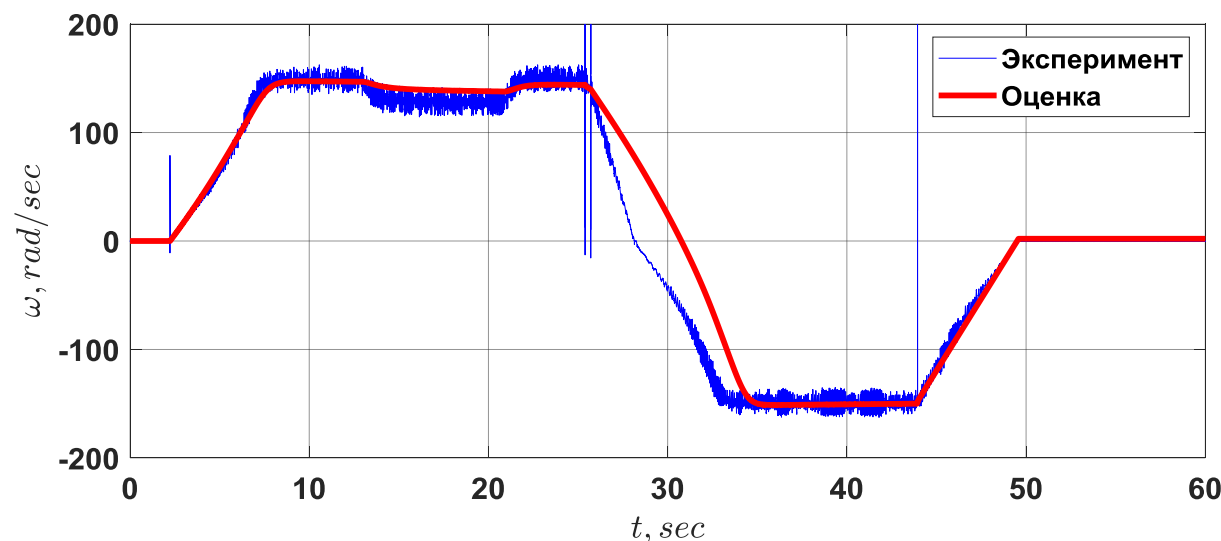


Рис. 7. Экспериментальный и оцененный сигнал угловой скорости вращения ротора АД, подключенного к источнику питания через кабельную линию

Fig. 7. Experimental and estimated signal of the angular velocity of rotation of the IM rotor connected to a power source via a cable line

Таблица 4. Сводная таблица ошибки оценивания угловой скорости вращения и полной потребляемой мощности при изменении электрических параметров (изменение параметров кодируется в бинарном виде) и масштабирующих коэффициентах $k_1 = 0,815$, $k_2 = 10,934$, $k_3 = 3,151$, $k_4 = 10,245$

Table 4. Summary table of errors in estimating rotation angular velocity and total power consumption when changing electrical parameters (parameter changes are encoded in binary form) and scaling coefficients $k_1 = 0,815$, $k_2 = 10,934$, $k_3 = 3,151$, $k_4 = 10,245$

№	Величина изменения электрического параметра от номинального, о. е. Changes in the electrical parameter from the nominal, p. u.								ε_s	ε_ω
	$R_{\text{каб}}$	$L_{\text{каб}}$	$C_{\text{каб}}$	$G_{\text{каб}}$	R_1	R_2	$L_{1\sigma}$	L_m	%	
0	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	16,15	6,13
17	0,9	0,9	0,9	1,1	0,9	0,9	0,9	1,1	16,56	5,22
34	0,9	0,9	1,1	0,9	0,9	0,9	1,1	0,9	6,13	6,62
51	0,9	0,9	1,1	1,1	0,9	0,9	1,1	1,1	6,88	6,53
68	0,9	1,1	0,9	0,9	0,9	1,1	0,9	0,9	20,75	5,75
85	0,9	1,1	0,9	1,1	0,9	1,1	0,9	1,1	21,20	5,71
102	0,9	1,1	1,1	0,9	0,9	1,1	1,1	0,9	6,47	6,41
119	0,9	1,1	1,1	1,1	0,9	1,1	1,1	1,1	6,51	6,78
136	1,1	0,9	0,9	0,9	1,1	0,9	0,9	0,9	16,77	8,08
153	1,1	0,9	0,9	1,1	1,1	0,9	0,9	1,1	17,24	7,12
170	1,1	0,9	1,1	0,9	1,1	0,9	1,1	0,9	6,09	4,96
187	1,1	0,9	1,1	1,1	1,1	0,9	1,1	1,1	6,63	5,17
204	1,1	1,1	0,9	0,9	1,1	1,1	0,9	0,9	20,21	9,20
221	1,1	1,1	0,9	1,1	1,1	1,1	0,9	1,1	20,16	9,22
238	1,1	1,1	1,1	0,9	1,1	1,1	1,1	0,9	6,86	7,07
255	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	6,85	7,35



Рис. 8. Результаты полного факторного эксперимента при исследовании ошибки оценивания угловой скорости вращения АД (красная) и полной потребляемой мощности (синяя) при изменении параметров на участке работы 5–25 с

Fig. 8. Results of a full-factor experiment when studying an error in estimating the angular velocity of IM rotation (red) and the total power consumption (blue) when changing the parameters at the work site for 5–25 sec

Как видно из табл. 4 и рис. 8, полный факторный анализ позволил исследовать каждую комбинацию всех электромагнитных параметров и экспериментально подтвердить работоспособность наблюдателя полного порядка электротехнического комплекса «кабельная линия – асинхронный двигатель» и разработанной методики настройки масштабирующих коэффициентов для обеспечения повышенной параметрической робастности. В результате анализа выявлено, что максимальная ошибка оценивания угловой скорости вращения ротора асинхронного двигателя на установившемся участке работы не превышает 10 %, а ошибка оценивания полной потребляемой мощности не превышает 25 %.

Обсуждение результатов

В результате разработки наблюдателя, математическое описание которого представлено в (1), удалось

косвенно, только на основании измерения токов и напряжений на входе кабельной линии, оценить угловую скорость вращения вала АД в составе экспериментальной установки. Ошибка оценивания на участке работы от 0 до 60 секунд составила 11,37 %. Основной вклад в эту ошибку внес промежуток от 25 до 32 секунд, на котором происходил реверс вращения АД. Однако на участке работы от 5 до 25 секунд (пуск под нагрузкой/наброс дополнительной нагрузки/сброс дополнительной нагрузки) ошибка оценивания составляет 4,51 %, что является приемлемым результатом. Проводя анализ причин неверной оценки угловой скорости вращения на участке «реверс», коллектив авторов пришел к выводу, что такая ошибка появляется из-за смены «фазировки» питающей сети, что приводит к увеличению магнитных потерь (перематывание, вихревые токи) на реактивных компонентах кабельной линии и АД. А так как в математи-

ческом ядре наблюдателя не учитываются магнитные потери в кабеле и АД, это, в свою очередь, приводит к неверной оценке тока, потокосцепления, момента и угловой скорости вращения ротора АД. В дальнейшем необходимо уточнять ядро наблюдателя для учета данных процессов либо реализовывать перенастраиваемую структуру наблюдателя, которая позволит с необходимой точностью оценивать угловую скорость вращения в режиме работы «реверс». Необходимость правильной оценки угловой скорости в режиме «реверс» в привязке к УЭЦН обусловлена тем, что такой режим используется во многих алгоритмах расклинивания насоса. Некорректная оценка угловой скорости и момента на валу электродвигателя при расклинивании насоса способна, в крайнем случае, привести к обрыву компоновки насоса и ее «полету» на забой скважины.

Апробирование разработанного наблюдателя на робастность происходило при помощи проведения полного факторного эксперимента для восьми факторов. В результате проведения 256 опытов была вычислена ошибка оценивания угловой скорости вращения и потребляемой полной мощности на участке работы от 5 до 25 секунд. Максимальная ошибка оценивания составила 9,22 % для угловой скорости вращения и 24,00 % для потребляемой полной мощности. Такие результаты говорят о том, что настроенный по предложенной авторами методике наблюдатель обладает свойствами робастности в указанном диапазоне изменения параметров схемы замещения электротехнического комплекса «кабельная линия – асинхронный двигатель».

Заключение

1. Разработана методика настройки масштабирующих коэффициентов в наблюдателе полного порядка вектора переменных состояния электротехнического комплекса. Основная идея заключается в том, что в процессе минимизации целевой функции $F(t, \hat{k}_1, \hat{k}_2, \hat{k}_3, \hat{k}_4)$ и поиска значений масштабирующих коэффициентов $\hat{k}_1, \hat{k}_2, \hat{k}_3, \hat{k}_4$ наблюдателя полного порядка необходимо заведомо занижить оцененные параметры схемы замещения $R_{\text{каб}}, L_{\text{каб}}, C_{\text{каб}}, G_{\text{каб}}, R_1, L_{1\delta}, L_m, R'_2, J$ электротехнического комплекса «кабельная линия –

асинхронный двигатель» в 0,9 раз. Разработанная методика настройки масштабирующих коэффициентов обеспечила работоспособность наблюдателя при изменении каждого электромагнитного параметра исследуемого комплекса на 10 % в большую и меньшую сторону.

2. Разработан наблюдатель полного порядка с оперативным мониторингом момента сопротивления вектора переменных состояния электротехнического комплекса «кабельная линия – асинхронный двигатель», отличающийся от известных тем, что кабельная линия представлена редуцированной моделью с сосредоточенными параметрами. Даны рекомендации по определению количества звеньев редуцированной математической модели кабельной линии. Обеспечена погрешность оценивания угловой скорости вращения на участке «пуск под нагрузкой/наброс дополнительной нагрузки/сброс дополнительной нагрузки» менее 5 %.
3. Проведен полный факторный эксперимент для восьми факторов. Выполнено $2^8=256$ опытов, по результатам которых выявлено, что при любой комбинации значений электрических параметров схемы замещения электротехнического комплекса «кабельная линия – асинхронный двигатель», изменённых в диапазоне от 0,9 до 1,1 от номинальных значений, наблюдатель оценивает угловую скорость вращения на таком участке с погрешностью не более 10 %. На основании данных, полученных в ходе полного факторного эксперимента, можно сделать вывод о том, что методика настройки масштабирующих коэффициентов разработанного наблюдателя вектора переменных состояния электротехнического комплекса «кабельная линия – асинхронный двигатель», представленная в данной статье, позволяет обеспечить параметрическую робастность оценки вектора переменных состояния.

Исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FENG-2023-0001 «Предиктивное управление потоками энергии электрогенерирующих комплексов Арктики и Крайнего Севера, при стохастических характерах потребления и генерации электрической энергии: теория, синтез, эксперимент»).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Информационно правовой материал «О мерах по повышению нефтеотдачи пластов на период до 2035 года» в Комитет Совета Федерации России по экономической политике. URL: <http://council.gov.ru/media/files/VGdL7GEAXLLocKmDf9tiKPD8fS0xuyQA.pdf> (дата обращения 19.05.2023).
2. Прогноз долгосрочного социально-экономического развития РФ на период до 2030 года. URL: <http://static.government.ru/media/files/41d457592e04b76338b7.pdf> (дата обращения 17.05.2022).
3. Общая дискуссия по приоритету: выступления академиков РАН А.Э. Конторовича, С.П. Филиппова, С.В. Алексеенко, В.И. Бухтиярова, С.М. Алдошина / А.Э. Конторович, С.П. Филиппов, С.В. Алексеенко, В.И. Бухтияров, С.М. Алдошин // Вестник Российской академии наук. – 2019. – Т. 89. – № 4. – С. 343–347. DOI: 10.31857/S0869-5873894343-347
4. Кладиев С.Н. Обзор и критический анализ современного состояния, путей развития технологического процесса добычи нефти электроприводным способом в прерывистых режимах эксплуатации мало- и среднедебитных скважин // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2023. – Т. 334. – № 8. – С. 220–231.
5. Исаев Ю.Н., Архипова О.В., Ковалев В.З., Хамитов Р.Н. Адаптивное краткосрочное прогнозирование потребления электроэнергии автономными энергосистемами малых северных поселений на основе методов корреляционного анализа // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2023. – Т. 334. – № 2. – С. 224–239.
6. Романов В.С., Гольдштейн В.Г., Сенько В.В. Управление ресурсами и жизненными циклами погружного электрооборудования нефтедобычи на основе технической диагностики и динамики изменения его текущего состояния // Изв. вузов. Электромеханика. – 2021. – Т. 64. – № 4–5. – С. 46–52. DOI: 10.17213/0136-3360-2021-4-5-46-52.

7. О некоторых перспективных путях развития УЭЦН / В.Н. Ивановский, Ю.А. Сазонов, А.А. Сабиров, Н.Н. Соколов, Ю.А. Донской // Территория нефтегаз. – 2008. – № 5. – С. 24–33.
8. Надежность погружных нефтяных насосов при периодической эксплуатации / Е.А. Лихачева, В.Г. Островский, Н.А. Лыкова, А.Н. Мусинский, П.А. Байдаров // ПРОнефть. Профессионально о нефти. – 2021. – Т. 6. – № 1. – С. 54–58. DOI: 10.51890/2587-7399-2021-6-1-54-58
9. Антипин М.Н. Результаты внедрения циклической эксплуатации УЭЦН в ОАО «Самотлорнефтегаз» // ПТНЖ «Инженерная практика». – 2011. – № 5. – С. 74–80.
10. On the optimization of the periodic mode of well production, which is operated by submersible electric pumps in Rosneft Oil Company (Russian) / A.A. Pashali, R.S. Khalfin, D.V. Silnov, A.S. Topolnikov, B.M. Latypov / OIJ. – 2021. – P. 92–96. DOI: <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2021-4-92-96>
11. Electrical submersible pump complex model for sensorless parameters observing / R. Iudin, A. Petrochenkov, B. Krause, E. Solodkiy, G. Panchenko // 2021 IEEE 62nd International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University. – Riga, Latvia, 2021. – P. 1–5. DOI: 10.1109/RTUCON53541.2021.9711743.
12. Rabbi S.F., Constantine M., Rahman M.A. A novel sensorless IPM motor drive for electric submersible pumps // 2017 IEEE International Electric Machines and Drives Conference. – Miami, FL, USA, 2017. – P. 1–8. DOI: 10.1109/IEMDC.2017.8002199.
13. Hussain H.A., Anvari B., Toliyat H.A. A control method for linear permanent magnet electric submersible pumps in a modified integrated drive-motor system // 2017 IEEE International Electric Machines and Drives Conference. – Miami, FL, USA, 2017. – P. 1–7. DOI: 10.1109/IEMDC.2017.8002315.
14. Improved speed sensorless vector control algorithm of induction motor based on long cable / Y. Deng, Z. Liang, P. Xia et al. // J. Electr. Eng. Technol. – 2019. – V. 14. – P. 219–229. URL: <https://doi.org/10.1007/s42835-018-00023-7> (дата обращения 19.05.2023).
15. ESP pump flow rate estimation and control: United States patent US 2017/0045055. 2017 Feb 16.
16. Vector control PWM-VSI induction motor drive with a long motor feeder: performance analysis of line filter networks / A.K. Abdelsalam, M.I. Masoud, S.J. Finney, B.W. Williams // IET Electr Power. – Jun. 2011. – V. 5. – № 5. – P. 443–456.
17. Design and implementation of position sensorless starting control in industrial drives with output filter and transformer for oil/pump applications / J. Liu, J. Dai, S. Royak, P. Schmidt, E. Al-nabi, T. Nondahl // 2017 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition. – Tampa, FL, USA, 2017. – P. 578–584. DOI: 10.1109/APEC.2017.7930752.
18. Liang X., Kar N.C., Liu J. Load filter design method for medium-voltage drive applications in electrical submersible pump systems // IEEE Transactions on Industry Applications. – May–June 2015. – V. 51. – № 3. – P. 2017–2029. DOI: 10.1109/TIA.2014.2369814.
19. Influence of motor cable on common-mode currents in an inverter-fed motor drive system / Pk. Xie, Jz. Lu, Gz. Chen et al. // Frontiers Inf Technol Electronic Eng. – 2018. – V. 19. – P. 273–284. URL: <https://doi.org/10.1631/FITEE.1601518> (дата обращения 19.05.2023).
20. Оптимизация порядка редуцированной динамической модели ненагруженного нефтепогружного кабеля на основе аппроксимации амплитудно-частотной характеристики / А.С. Глазырин, Ю.Н. Исаев, С.Н. Кладиев, А.П. Леонов, И.В. Раков, С.В. Колесников, С.В. Ланграф, А.А. Филипас, В.А. Копырин, Р.Н. Хамитов, В.З. Ковалев // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 9. – С. 154–167.
21. Раков И.В. Динамическая идентификация параметров схемы замещения асинхронного двигателя на основе баланса мгновенной полной мощности в установившемся режиме // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2023. – Т. 19. – № 1. – С. 24–48. DOI: 10.17122/1999-5458-2023-19-1-24-48.
22. Debabrata P. Observers design and implementation for DC motor // International Journal of Science and Research. – 2016 – V. 5. – P. 1232–1235.
23. Пантелеев А.В., Летова Т.А. Методы оптимизации в примерах и задачах. – СПб.: Лань, 2021. – 512 с.
24. Chaudhary R., Sanghavi R., Mahagaokar S. Optimization of Induction motor using genetic algorithm and GUI of optimal induction motor design in MATLAB // Advances in Systems, Control and Automation. Lecture Notes in Electrical Engineering. – 2018 – V. 442. – P. 127–132. URL: https://doi.org/10.1007/978-981-10-4762-6_12 (дата обращения 19.05.2023).
25. Elgbaily M., Anayi F., Packianather M. Genetic and particle swarm optimization algorithms based direct torque control for torque ripple attenuation of induction motor // Materials Today: Proceedings. – 2022. – V. 67. – № 4. – P. 577–590. URL: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.08.293> (дата обращения 19.05.2023).

Поступила: 24.08.2023 г.

Прошла рецензирование: 25.09.2023 г.

Информация об авторах

Раков И.В., инженер 1 категории, ООО «Газпром трансгаз Томск».

Глазырин А.С., доктор технических наук, профессор отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета; профессор Политехнической школы Югорского государственного университета.

Кладиев С.Н., кандидат технических наук, доцент отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 621.315.2.016.2:621.313.333.2

DEVELOPMENT AND CONFIGURATION OF A FULL-ORDER OBSERVER FOR «CABLE LINE – INDUCTION MOTOR» ELECTRICAL COMPLEX

Ivan V. Rakov¹,
rakovivan@live.com

Alexander S. Glazyrin^{2,3},
asglazyrin@tpu.ru

Sergey N. Kladiev²,
kladiev@tpu.ru

¹ Gazprom transgaz Tomsk LLC,
9, Frunze avenue, Tomsk, 634029, Russia.

² National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

³ Yugra State University,
16, Chekhov street, Khanty-Mansiysk, 628012, Russia.

The relevance. The task of oil production specialists is to minimize all types of energy consumption, ensuring an increase in oil production profitability because of the following reasons. First of all, availability of oil reserves with low energy consumption decreases, and the number of gushing wells reduces, along with increase in water content in the extracted liquid. One of the methods of reducing energy consumption in wells with low and moderate flow rate, equipped with electric submersible pumps, is a well transfer from continuous to periodic operation mode, namely cyclic well operation. This involves alternating short periods of oil production (up to 15 minutes) with liquid accumulation (up to 30 minutes) in the wellbore. Well switching to a cyclic operation mode leads to a 40 % reduction in electric power consumption by the submersible electric motor, as well as increase in oil production up to 3 %. This can be achieved by partial gravitational separation of the extracted liquid at the accumulation stage. However, a negative consequence of switching to a cyclic operation mode is a reduction in an average time between failures. This is due to increase in current surges and torque during rapid acceleration of the submersible electric motor to the rated speed. Transition from a scalar control system with an open loop to a vector control system without sensors can settle these problems. To implement a vector control system, it is necessary to obtain information about the state variables of a submersible electric motor. Construction of a full-order observer based on explicit mathematical models is considered as a promising method of obtaining information, taking into account the main advantages and disadvantages of direct measurement and indirect estimation of state variables. Based on the above, the urgent task is to develop a full-cycle observer for the electromechanical complex «cable line – induction motor» and a methodology for its configuration. The settlement of this issue will create prerequisites for implementation of a vector control system by a submersible electric motor.

The main aim: to develop and experimentally validate the effectiveness of a full-order observer for the electrical complex «cable line – induction motor» using voltage and current measurements at a cable line input.

Methods: literature analysis, system analysis, mathematical modeling, experimental research.

Results. The authors have developed and tested a full-order observer for the «cable line – induction motor» electrical complex. The results of this study confirm the efficiency of the developed observer and its potential applicability for implementing a vector control system for electric submersible pumps. Ultimately, this will enable the transition of low- and medium-flow-rate oil wells to a cyclically operated mode without a significant reduction of the mean time between failures.

Key words:

full-order observer, electromechanical complex, cable line, induction motor, experimental workbench testing, observer tuning methodology, genetic algorithm, observer adjustment, control system, electric submersible pump, cyclic well operation, periodic well operation, mean time between failures, low- and moderate-flow wells, stochastic nature of electrical energy consumption.

The study was carried out within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (topic no. FENG-2023-0001 «Predictive control of energy flows of electricity generating complexes in the Arctic and the Far North, with stochastic patterns of consumption and generation of electrical energy: theory, synthesis, experiment»).

REFERENCES

1. *Informatsionno pravovoy material «O merakh po povysheniyu nefteotdachi plastov na period do 2035 goda» v Komitet Soveta Federatsii Rossii po ekonomicheskoy politike* [Information and legal material «On measures to increase oil recovery for the period up to 2035» to the Committee of the Federation Council of Russia on Economic Policy]. Available at: <http://council.gov.ru/media/files/VGdL7GEAXLLocKmDf9tiKPD8fS0xuyQA.pdf> (accessed 19 May 2023).
2. *Prognoz dolgosrochnogo sotsialno-ekonomicheskogo razvitiya RF na period do 2030 goda* [Forecast of the long-term socioeconomic development of the Russian Federation for the period up to 2030]. Available at: <http://static.government.ru/media/files/41d457592e04b76338b7.pdf> (accessed 12 May 2023).
3. Kontorovich A.E., Filippov S.P., Alekseenko S.V., Bukhtiyarov V.I., Aldoshin S.M. Discussion on the priority: speech of the RAS academicians A.E.Kontorovich, S.P. Filippov, S.V. Alekseenko, V.I. Bukhtiyarov, S.M. Aldoshin. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences*, 2019, vol. 89, no. 4, pp. 343–347. In Rus. DOI: 10.31857/S0869-5873894343-347

4. Kladiev S.N. Review and critical analysis of the current state and ways of developing the technological process of oil production by an electric drive in intermittent modes of operation of low- and medium-rate wells. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2023, vol. 334, no. 8, pp. 220–231. In Rus.
5. Isaev Y.N., Arkhipova O.V., Kovalev V.Z., Khamitov R.N. Adaptive short-term forecasting of electricity consumption by autonomous power systems of small northern settlements based on correlation analysis methods. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2023, vol. 334, no. 2, pp. 224–239. In Rus.
6. Romanov V.S., Goldstein V.G., Senko V.V. Resource and lifecycle management of submersible electrical equipment for oil production based on technical diagnostics and the dynamics of changes in its current state. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Elektromekhanika = Russian Electromechanics*, 2021, vol. 64, no. 4–5, pp. 46–52. In Rus. DOI: 10.17213/0136-3360-2021-4-5-46-52
7. Ivanovskiy V.N., Sazonov Yu.A., Sabirov A.A., Sokolov N.N., Donskoy Yu.A. O nekotorykh perspektivnykh putyakh razvitiya UECN [On some potential ways of ESP development]. *Territoriya neftegaz*, 2008, no. 5, pp. 24–33.
8. Likhacheva E.A., Ostrovskiy V.G., Lykova N.A., Musinskiy A.N., Baidarov P.A. Oil submersible pumps reliability during cyclic operation. *PRoneft. Professionally about Oil*, 2021, vol. 6 (1), pp. 54–58. In Rus. DOI: <https://doi.org/10.51890/2587-7399-2021-6-1-54-58>
9. Antipin M.N. Resultaty vnedreniya tsiklicheskoj ekspluatatsii UETSN v OAO «Samotlorneftegaz» [Results of introduction of the electrical submersible cyclic operation pump units on JSC «Samotlorneftegaz»]. *Innovatsii i novye tehnologii v oblasti mekhanizirovannoy dobychi nefti*, 2011, no. 5, pp. 74–81.
10. Pashali A.A., Khalifin R.S., Silnov D.V., Topolnikov A.S., Latypov B.M. On the optimization of the periodic mode of well production, which is operated by submersible electric pumps in Rosneft Oil Company (Russian). *OIJ*, 2021, pp. 92–96. DOI: <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2021-4-92-96>
11. Iudin R., Petrochenkov A., Krause B., Solodkiy E., Panchenko G. Electrical submersible pump complex model for sensorless parameters observing. *2021 IEEE 62nd International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University*. Riga, Latvia, 2021. pp. 1–5. DOI: 10.1109/RTUCON53541.2021.9711743.
12. Rabbi S.F., Constantine M., Rahman M.A. A novel sensorless IPM motor drive for electric submersible pumps. *2017 IEEE International Electric Machines and Drives Conference*. Miami, FL, USA, 2017. pp. 1–8. DOI: 10.1109/IEMDC.2017.8002199.
13. Hussain H.A., Anvari B., Toliyat H.A. A control method for linear permanent magnet electric submersible pumps in a modified integrated drive-motor system. *2017 IEEE International Electric Machines and Drives Conference*. Miami, FL, USA, 2017. pp. 1–7. DOI: 10.1109/IEMDC.2017.8002315.
14. Deng Y., Liang Z., Xia P. Improved speed sensorless vector control algorithm of induction motor based on long cable. *J. Electr. Eng. Technol.*, 2019, vol. 14, pp. 219–229. Available at: <https://doi.org/10.1007/s42835-018-00023-7> (accessed 19 May 2023).
15. Hoefel A., Rendusara D. *ESP pump flow rate estimation and control*. United States patent US 2017/0045055, 2017 Feb 16.
16. Abdelsalam A.K., Masoud M.I., Finney S.J., Williams B.W. Vector control PWM-VSI induction motor drive with a long motor feeder: performance analysis of line filter networks. *IET Electr. Power*, Jun. 2011, vol. 5, no. 5, pp. 443–456.
17. Liu J., Dai J., Royak S., Schmidt P., Al-nabi E., Nondahl T. Design and implementation of position sensorless starting control in industrial drives with output filter and transformer for oil/pump applications. *2017 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition*. Tampa, FL, USA, 2017. pp. 578–584. DOI: 10.1109/APEC.2017.7930752.
18. Liang X., Kar N.C., Liu J. Load filter design method for medium-voltage drive applications in electrical submersible pump systems. *IEEE Transactions on Industry Applications*, May–June 2015, vol. 51, no. 3, pp. 2017–2029. DOI: 10.1109/TIA.2014.2369814.
19. Xie Pk., Lu Jz., Chen Gz. Influence of motor cable on common-mode currents in an inverter-fed motor drive system. *Frontiers Inf Technol Electronic Eng*, 2018, vol. 19, pp. 273–284. Available at: <https://doi.org/10.1631/FITEE.1601518> (accessed 19 May 2023).
20. Glazyrin A.S., Isaev Yu.N., Kladiev S.N., Leonov A.P., Rakov I.V., Kolesnikov S.V., Langraf S.V., Philipas A.A., Kopyrin V.A., Khamitov R.N., Kovalev V.Z. Unloaded oil-submersible cable reduced dynamic model order optimization based on the frequency response approximation. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 9, pp. 154–167.
21. Rakov I.V. Dynamic estimation parameters of the elimination circuit of induction motor on the basis of instant full power balance in a steady-state mode. *Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2023, vol. 19, no. 1, pp. 24–48 In Rus. DOI: <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2023-19-1-24-48>.
22. Debabrata P. Observers design and implementation for DC motor. *International Journal of Science and Research*, 2016, vol. 5, pp. 1232–1235.
23. Pantelev A.V., Letova T.A. *Metody optimizatsii v primerakh i zadachakh* [Optimization methods in examples and tasks]. St Petersburg, Lan Publ., 2021. 512 p.
24. Chaudhary R., Sanghavi R., Mahagaokar S. Optimization of induction motor using genetic algorithm and GUI of optimal induction motor design in MATLAB. *Advances in Systems, Control and Automation. Lecture Notes in Electrical Engineering*, 2018, vol. 442, pp. 127–132. Available at: https://doi.org/10.1007/978-981-10-4762-6_12 (accessed 19 May 2023).
25. Elgbaily M., Anayi F., Packianather M. Genetic and particle swarm optimization algorithms based direct torque control for torque ripple attenuation of induction motor. *Materials Today: Proceedings*, 2022, vol. 67, no. 4, pp. 577–590. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.08.293> (accessed 19 May 2023).

Received: 24 August 2023.

Reviewed: 25 September 2023.

Information about the authors

Ivan V. Rakov, 1 category engineer, Limited Liability Company «Gazprom transgaz Tomsk».

Alexander S. Glazyrin, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University; professor, Yurga State University.

Sergey N. Kladiev, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 550.379

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ОПТИМАЛЬНОЙ СЕТИ НАБЛЮДЕНИЯ ДЛЯ КАРТИРОВАНИЯ ПАЛЕОРУСЛА МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОТОМОГРАФИИ НА ОСНОВЕ ЧИСЛЕННОГО И ФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Осипова Полина Сергеевна¹,
OsipovaPS@ipgg.sbras.ru

Оленченко Владимир Владимирович¹,
OlenchenkoVV@ipgg.sbras.ru

Чекрызов Андрей Васильевич¹,
ChekryzhovAV@ipgg.sbras.ru

¹ Институт нефтегазовой геологии и геофизики им А.А. Трофимука СО РАН,
Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3.

Актуальность исследования объясняется необходимостью определения методических особенностей применения метода электротомографии при картировании палеорусел при поисках россыпного золота.

Цель: определить необходимые и достаточные параметры сети наблюдения для картирования палеорусла на основе численного и физического моделирования.

Объект: электрические поля на физической и численной модели палеорусла.

Методы: электротомография, физический эксперимент, численное моделирование.

Результаты. Электрические зондирования методом электротомографии проведены на физической модели речной долины. Дополнительно выполнен численный эксперимент на трёхмерной модели фрагмента речной долины с палеоруслом. За единицу масштаба съёмки принято межэлектродное расстояние, которое в эксперименте равно 1 см и эквивалентно 5 м при реальных полевых исследованиях. Расстояние между профилями изменялось от 2 до 12 см с шагом 2 см, что соответствует разным масштабам съёмки. В соответствии с геологическими представлениями собрана модель речной долины с сегментной пологой стадией формирования излучины русла. Трёхмерная инверсия проводилась для набора данных, полученных при максимальной плотности сети наблюдения, и затем для разреженных до нужного масштаба данных. На карте удельного электрического сопротивления палеорусло выделяется лентообразной высокоомной аномалией. Анализ карт показал, что для восстановления формы палеорусла в плане необходимо использовать масштаб сети наблюдения 1:3000, при котором расстояние между профилями равно 30 м. Результаты физического эксперимента подтверждены математическим моделированием. Для повышения экономической эффективности геофизических исследований предложено уменьшение масштаба до 1:5000 с детализацией на отдельных участках.

Ключевые слова:

палеорусло, электротомография, оптимальная сеть, физическое моделирование, аллювиальная россыпь золота.

Введение

Среди различных типов россыпных месторождений ведущую роль занимают аллювиальные россыпи, связанные с русловыми отложениями рек, в том числе палеоруслами [1]. Именно в них наблюдается максимальная концентрация металла. Одной из проблем при изучении палеорусел является их слабая выраженность в современном рельефе, поскольку они находятся в погребённом состоянии. Эффективность поисков и разведки аллювиальных россыпей повышается за счет использования геофизических методов [1, 2].

Палеорусла заполнены отложениями русловых фаций – валунами, галькой и гравием [3–5]. Контраст по удельному электрическому сопротивлению (УЭС) между породами русловых фаций, вмещающими их отложениями пойменной фации и выветрелыми вблизи кровли коренными породами позволяет использовать электроразведочные методы для выявления палеорусел.

Метод электротомографии (ЭТ) уже положительно зарекомендовал себя для выявления палеорусел [6–9] и в том числе для решения поисковых задач на россыпное золото [10–13]. Однако требования к ме-

тодике ЭТ, определяющие необходимый масштаб и детальность съёмки при поисках россыпного золота, остаются непроработанными [10, 14]. Чаще всего исследования выполняются по отдельным профилям, а если съёмка выполнена в площадном варианте, то вопрос выбора сети наблюдений методом ЭТ в публикациях не рассматривается.

Геологическая задача будет решена в том случае, когда сеть геофизических наблюдений будет оптимальной, то есть с вероятностью близкой к единице позволит определить геометрические параметры объекта исследования при наименьших затратах средств [15]. При площадных исследованиях методом ЭТ расстояние между профилями не должно превышать двух-четырёхкратного расстояния между электродами [16]. Однако при такой детальности слишком велики временные и экономические затраты. Цель этого исследования – определить необходимые и достаточные параметры сети ЭТ для картирования палеорусла при поисковых работах на россыпное золото на основе физического моделирования.

Выбор физического моделирования как метода исследования обусловлен тем, что оно обеспечивает

возможность создания модели, приближенной к реальной геологической среде. Для верификации результатов физического моделирования было проведено трёхмерное численное моделирование электрических полей.

Методика физического моделирования

Согласно теории физического моделирования [17, 18] необходимыми условиями эксперимента являются геометрическое подобие (подобие формы) и физическое подобие модели и природы. Два объекта будут геометрически подобными, если любой линейный размер одного из них можно получить из линейного размера другого путем умножения на постоянный множитель – коэффициент подобия.

Метод ЭТ представляет собой геометрические зондирования, в которых применяется переменный ток низкой частоты (2–5 Гц), эквивалентный постоянному току. Распространение тока в среде зависит от электропроводности материала, а не от размера или формы вещества.

В методе ЭТ расчётным параметром является кажущееся удельное электрическое сопротивление ρ_k , получаемое по формуле

$$\rho_k = K \frac{\Delta U_{MN}}{I_{AB}}, \quad (1)$$

где K – геометрический коэффициент установки; ΔU_{MN} – измеренная разность потенциалов между приемными электродами M и N ; I_{AB} – ток в питающей линии AB .

Измеряемый сигнал ΔU_{MN} пропорционален геометрическому коэффициенту установки k , который определяется расстоянием между электродами a (рис. 1). Следовательно, для установки ЭТ справедливо геометрическое подобие.

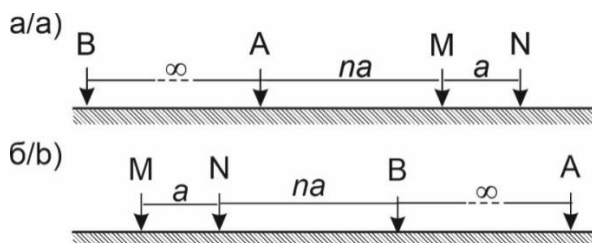


Рис. 1. Схема прямой (а) и обратной (б) трехэлектродной установки электротомографии

Fig. 1. Scheme of forward (a) and reverse (b) pole-dipole arrays for electrical resistivity tomography

Размеры физической модели речной долины являются геометрически подобными размерам реальной долины. За единицу масштаба съемки принято межэлектродное расстояние a , которое в эксперименте равно 1 см. Это расстояние эквивалентно 5 м при реальных полевых исследованиях. Коэффициент геометрического подобия электроразведочной установки составил 1:500.

Геологическая модель аллювиальной россыпи

В общем виде геологическая модель аллювиальной россыпи трёхслойная [4, 5]. На коренных породах

(плотике) залегают отложения русловых фаций, перекрытые фациями поймы.

Породы плотика могут быть разными – карбонатные, песчаники, сланцы, метаморфические и магматические породы. На контакте с аллювиальными отложениями они интенсивно трещиноватые или выветрелые до состояния щебня с суглинистым заполнителем или суглинка. В этом случае основание будет более проводящим по сравнению с перекрывающими отложениями. Когда плотик представлен неизменными магматическими или метаморфическими породами, УЭС коренных пород будет выше, чем УЭС аллювия [19].

Отложения, залегающие непосредственно на плотике, представлены фациями кос и береговых отелей. Они сложены мелким и хорошо промытым песчаным материалом с кривой слоистостью диагонального типа. В них вложены фации плёсов и перекастов валунно-галечникового состава, богатые россыпным золотом. Этот слой – палеорусло – и является объектом поисков при геофизических исследованиях. Наиболее благоприятные условия для формирования россыпей создаются на полугорных реках.

Перекрывающие отложения пойменных фаций формируются в периоды половодий и представляют собой супесчано-суглинистый материал.

В соответствии с геологическими представлениями мы собрали модель речной долины с врезанным относительно прямолинейным руслом с узкой поймой. Моделируется ситуация, когда породы плотика высокоомные. Модель помещалась в ящик из оргстекла размерами 120×40×15 см (рис. 2, а). Она состояла из вмещающей среды, представленной промытым мелкозернистым речным песком («торфа»), и мелкого галечника (3–5 мм), заполняющего модель русла и имитирующего отложения русловой фации аллювия («пески») мощностью 1,5 см. «Пески» перекрывались слоем «речников» – смесью гальки с песком – мощностью 0,5 см и «торфами» мощностью 0,5 см (рис. 2, б). Листы пластика имитировали высокоомные коренные породы, падающие под углом 30° к тальвегу долины. Ширина долины составила 14 см, ширина русла – 4а (4 см), глубина палеорусла – 2,5а (2,5 см). Согласно [20] степень развитости русла равна отношению длины излучины (l) по руслу к шагу излучины (L). В данном случае $l/L=1,1$, что характерно для русел сегментной пологой стадии формирования излучины ($1,1 < l/L < 1,4$). Коэффициент формы излучины равен отношению радиуса кривизны излучины к стреле прогиба $r/h_n=5$, поэтому в нашей модели излучина является пологой.

Рыхлый материал увлажнялся водопроводной водой перед укладкой. Постоянная влажность поддерживалась за счет опрыскивания водой раз в сутки и укрытия пленкой в нерабочие часы. Измерения на модели выполнялись в рабочие часы в течение трех дней.

Электропроводность водопроводной воды измерялась прибором COM-300 и в пересчёте на УЭС составляла в среднем 18 Ом·м. УЭС материалов определены прибором Miller 400D и приведены в таблице.

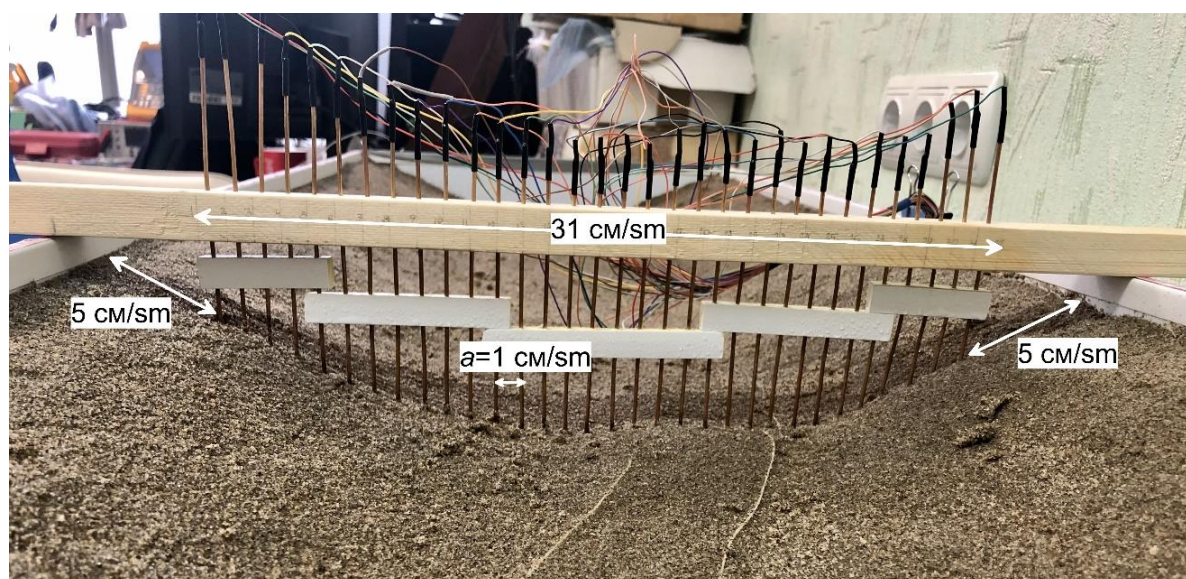


Рис. 3. Параметры измерительной установки

Fig. 3. Measuring setup parameters

Таблица. Электрические свойства материалов физической модели

Table. Electrical properties of physical model materials

Материал Material	УЭС, Ом·м/ER, Ohm·m
Песок/Sand	30–60
Песчано-галечная смесь Sand-pebble mixture	160
Галька/Pebble	650
Пластиковый откос (коренные породы) Plastic slope (bedrock)	∞

ER – electrical resistivity.

Методика измерений и обработки данных

Измерения выполнены с помощью аппаратуры Скала-64к15 с использованием 32 электродов. Длина профиля составила 31 см. Последовательность подключения электродов соответствовала трехэлектродной прямой и обратной установкам, которые имеют лучшую разрешающую способность при полевых работах. Разнос между приемными электродами (a) изменялся от 1 до 5 см, между питающим и приемным электродом, находящимся на профиле (na) – от 1 до 31 см (рис. 1, 3).

Расстояние между профилями (y) изменялось от 2 до 12 см с шагом 2 см, что при полевых исследованиях с шагом 5 м соответствует масштабам съёмки 1:1000, 1:2000, 1:3000, 1:4000, 1:5000 1:6000.

Для обработки данных применялись программы инверсии Res2DInv [21] и Res3DInv [22]. Согласно инструкции [23] к программам для идеальной трехэлектродной установки расстояние от профиля до удаленного электрода должно более чем в 5 раз превышать максимальный разнос na . В противном случае при инверсии необходимо учитывать расположение удаленного электрода. Из-за ограниченных размеров бака расстояние от профиля до удаленного электрода превышало максимальной разнос na от 2 до 4 раз в зависимости от положения профиля, что учитывалось при инверсии. Обратная задача решалась с

использованием робастной инверсии с настройками программы по умолчанию.

Трёхмерная инверсия проводилась для набора данных, полученных при максимальной плотности сети наблюдения ($y=2a$, или 2 см). Затем решение обратной задачи выполнялось для разреженных до нужного масштаба данных ($4a$, $6a$ и т. д.).

Оценка влияния глубины заземления электродов

В теории электрод представляет собой точечный источник тока, то есть его размеры намного меньше расстояния до точки наблюдения. Однако на практике при физическом моделировании добиться точечного заземления чрезвычайно сложно, поскольку уменьшение размера электрода приводит к резкому возрастанию сопротивления заземлений. При выполнении измерений на физической модели глубина погружения электродов составляла 3–5 мм, что позволило достичь сопротивления заземления на уровне 2–3 кОм, но при этом нарушались условия точечности.

Для оценки влияния глубины заземления электродов на результаты измерений проведен эксперимент на баке с водой. Измерения проведены установкой Шлюмберже с шагом между электродами 1 см с использованием того же оборудования, что и при измерениях на физической модели долины реки. Линия измерений располагалась по центру бака, расстояние до стенок составило 12 и 5 см. Электроды погружались в бак с водой на глубину 0,01, 5, 10 мм.

По результатам двумерной инверсии на геоэлектрических разрезах граница между слоем воды и дном определяется неверно вне зависимости от глубины погружения электродов, вероятно, из-за влияния боковых стенок бака (рис. 4). В случае точечного (0,01 мм) заземления УЭС слоя воды распределено неравномерно, присутствуют локальные высокоомные и проводящие аномалии. При заземлении электродов на глубину 5 мм слой воды определяется более однородным по УЭС и составляет 15–20 Ом·м.

При увеличении глубины погружения электродов в среду до 10 мм электросопротивление слоя воды по результатам инверсии определяется заниженным (10–15 Ом·м).

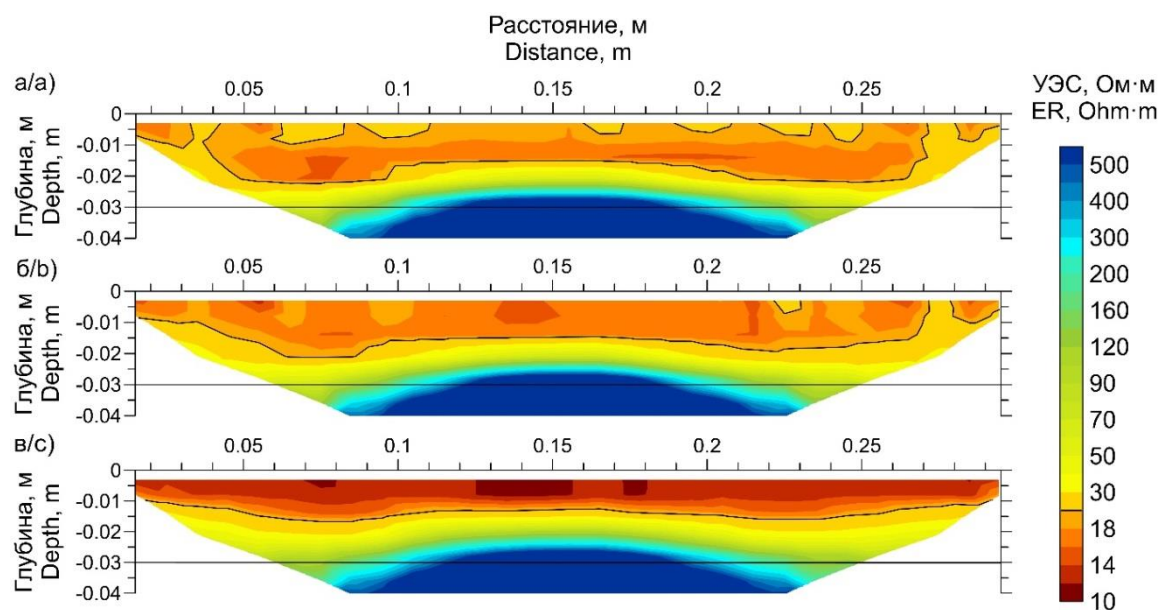


Рис. 4. Геоэлектрические разрезы, полученные в результате измерений в баке с водой, для установки с погружением электродов на глубину, мм: а) 0,01; б) 5; в) 10

Fig. 4. Goelectric sections obtained as a result of measurements in a tank with water for installation with electrodes immersed to a depth, mm: a) 0,01; b) 5; c) 10

В результате эксперимента определено, что для обеспечения хорошего заземления и исключения ложных аномалий электроды должны быть погружены в среду на глубину не более 5 мм.

Методика численного моделирования

Численное моделирование зондирований выполнялось в два этапа: решение прямой задачи и инверсия данных.

В программе ZondRes3D [23] составлена геоэлектрическая модель речной долины с палеоруслом, состоящим из одной извилины (рис. 5, а). Модель состоит из слоя коренных пород, двухслойного палеорусла мощностью 5 м и вмещающих его суглинков. Электрические характеристики слоев соответ-

ствуют физической модели. Геометрия долины изменена согласно масштабному коэффициенту (1:500) – шагу между электродами, равному 5 м. Система наблюдений состоит из 20 параллельных профилей длиной 155 м, расположенных на расстоянии 10 м друг от друга. Расчеты прямой задачи ЭТ выполнены для прямой и обратной трехэлектродных установок.

На втором этапе полученные значения ρ_k с добавленным шумом 5 % экспортированы для инверсии в программе Res3Dinv. Как и в физическом эксперименте, трёхмерная инверсия проводилась для данных, полученных при максимальной плотности сети наблюдения, а затем для разреженных до нужного масштаба.

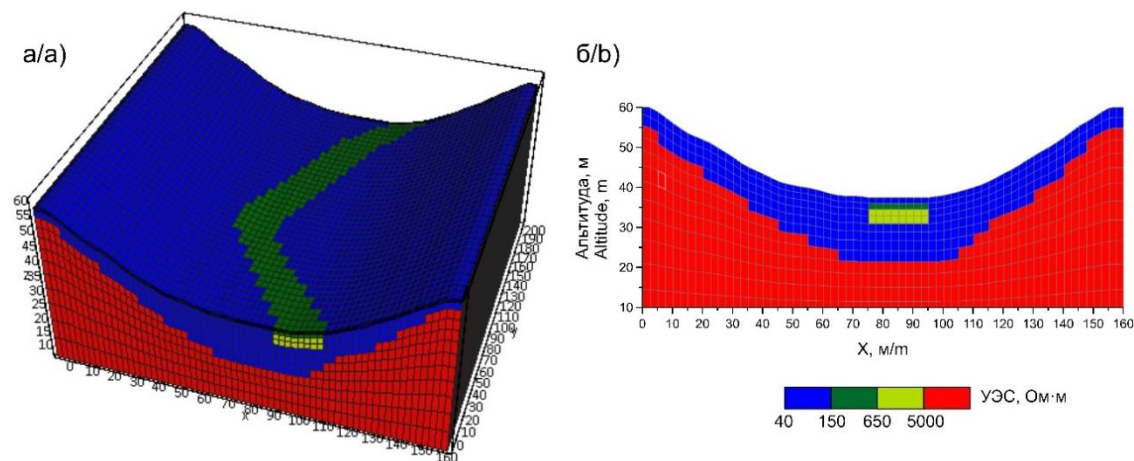


Рис. 5. Объемная геоэлектрическая модель (а) и разрез модели вдоль профиля (б)

Fig. 5. Volumetric geoelectric model (a) and model section along the profile (b)

Результаты

На геоэлектрическом разрезе по $X=50$ см по результатам двумерной инверсии в пределах палеоруслла в интервале 0,11–0,155 м на глубине 0,004–0,026 м выделяется аномалия повышенного сопротивления 150–450 Ом·м (рис. 6, а). Разрез осложнен локальными изоляторами (интервал 0,17–0,18 м, глубина 0,013–0,03 м) и проводниками (интервал 0,09–0,11 м, глубина 0,013–0,04 м и интервал 0,14–0,18 м, глубина 0,025–0,07 м). Они являются артефактами инверсии, которые возникают в контрастных средах, и связаны с использованием ограничения гладкости [24, 25]. Коренные породы определяются по аномалии высокого сопротивления в нижней части разреза. Глубина их залегания определяется верно, однако форма верхней границы искажена из-за ложных аномалий.

На геоэлектрическом разрезе по результатам 3-D инверсии УЭС песков более однородно (15–30 Ом·м) (рис. 6, б). Палеоруслло локализуется в интервале 0,11–0,16 м на глубине 0,004–0,025 м. Верхняя грани-

ца коренных пород восстанавливается на верной глубине.

Рассмотрим карты УЭС с глубины 0,019 м при разной плотности сети наблюдения (рис. 7). На этой глубине срез в физической модели расположена галька, имитирующая золотоносные отложения. При максимальной плотности сети наблюдения на карте УЭС палеоруслло выделяется лентообразной аномалией интенсивностью 100–400 Ом·м на фоне 10–70 Ом·м. Локальные аномалии в фоновой части модели (вмещающей среде), возникшие из-за неидеальности моделируемой системы и влияния стенок бака, можно рассматривать как геологический шум. Несмотря на этот шум, палеоруслло выявляется однозначно.

При разрежении интервала между профилями от 4а до 6а аномалия рассыпается на отдельные фрагменты, которые, однако, при интерпретации можно объединить в одну структуру. При дальнейшем увеличении u от 8а до 12а объединить отдельные аномалии затруднительно.

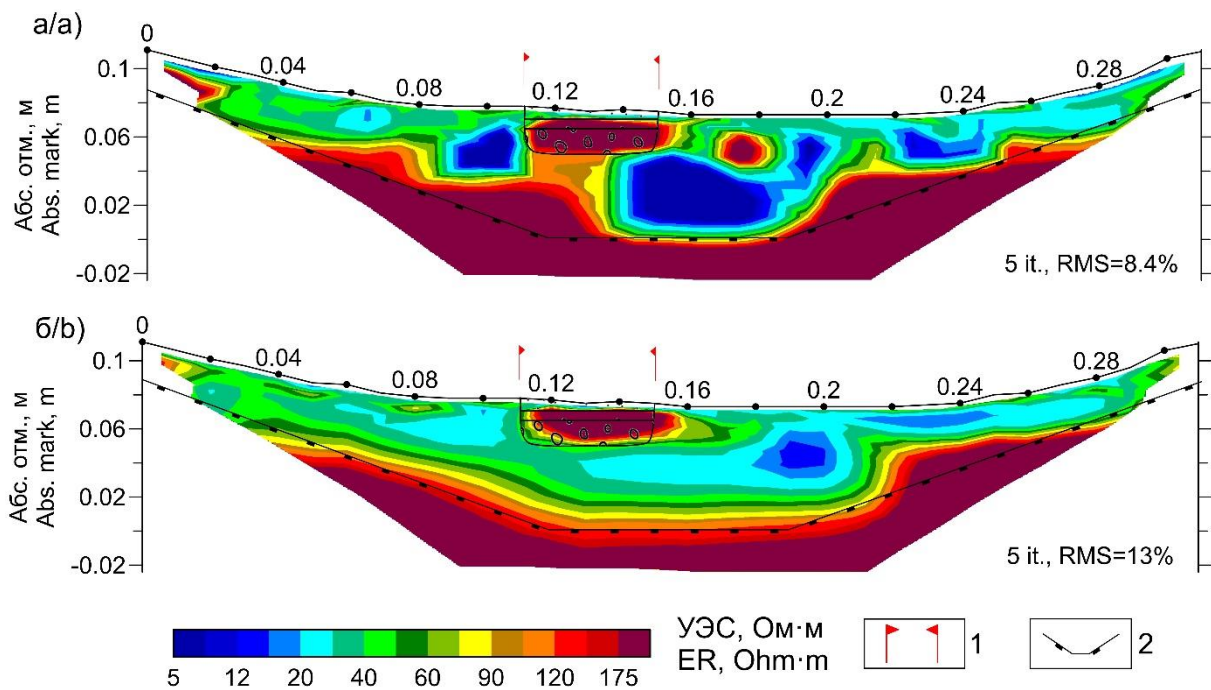


Рис. 6. Геоэлектрические разрезы по результатам 2-D (а) и 3-D (б) инверсии: 1 – реальные границы палеоруслла; 2 – реальное положение кровли коренных пород

Fig. 6. Goelectric sections by the results of 2-D (a) and 3-D (b) inversion: 1 – real boundaries of the paleochannel; 2 – actual position of the bedrock top

На карте для максимальной плотности синтетических данных аномалия от палеоруслла соответствует его реальному положению и геометрическим параметрам (рис. 8, а). Аномалия имеет яркий контраст УЭС с фоновыми значениями вмещающих пород. При разрежении сети до масштаба 1:2000 (4а) анома-

лия от палеоруслла менее однородна по УЭС, но форма восстанавливается отчетливо (рис. 8, б). Для карт, где профили расположены с интервалом 6а (рис. 8, в) и 8а (рис. 8, г), аномалия начинает разделяться на отдельные фрагменты, однако изгиб палеоруслла восстанавливается удовлетворительно.

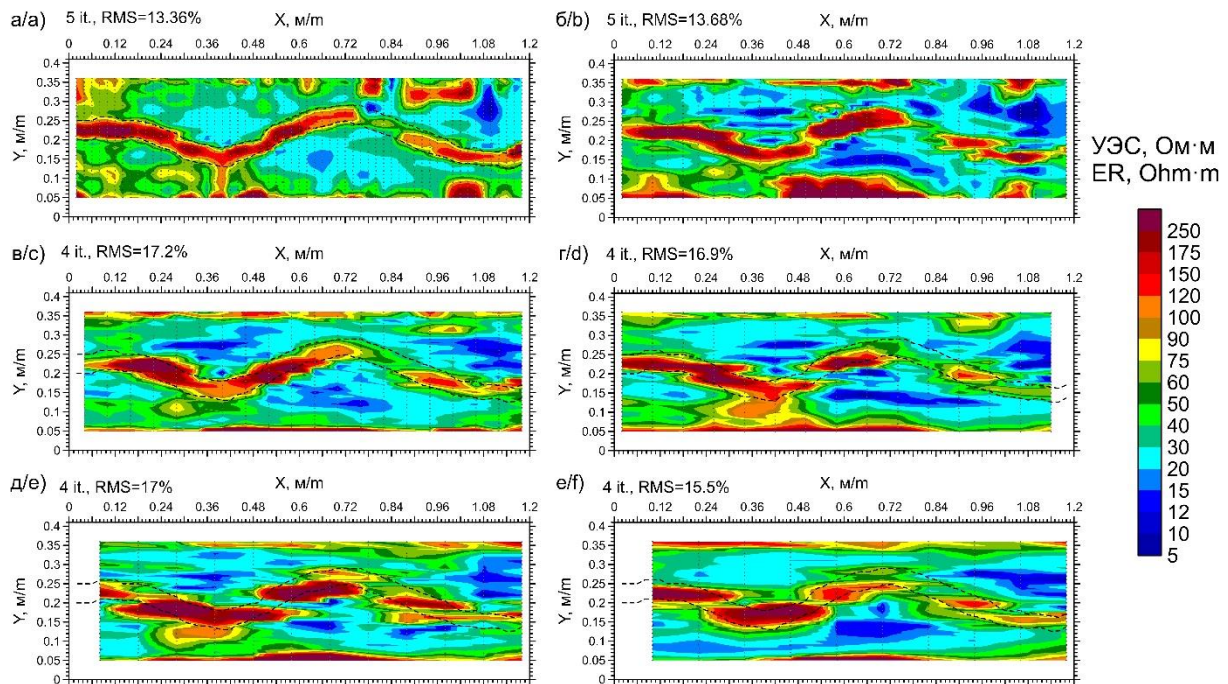


Рис. 7. Карты УЭС на глубине 0,019 м с интервалом между профилями: а) 2а (2 см); б) 4а (4 см); в) 6а (6 см); г) 8а (8 см); д) 10а (10 см); е) 12а (12 см)

Fig. 7. Maps of resistivity at the depth of 0,019 m with an interval between profiles: а) 2а (2 cm); б) 4а (4 cm); в) 6а (6 cm); д) 8а (8 cm); е) 10а (10 cm); ф) 12а (12 cm)

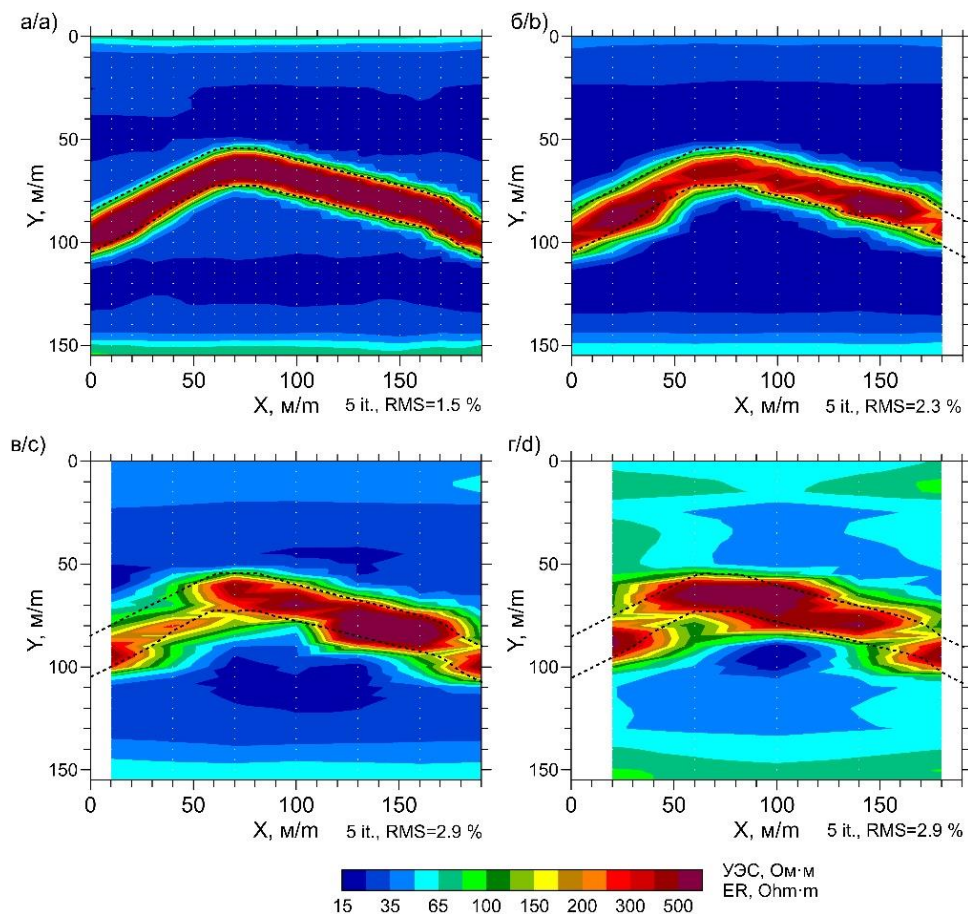


Рис. 8. Карты УЭС на глубине 3,5 м с интервалом между профилями: а) 2а (10 м); б) 4а (20 м); в) 6а (30 м); г) 8а (40 м)

Fig. 8. Maps of resistivity at the depth of 3,5 m with an interval between profiles: а) 2а (10 m); б) 4а (20 m); в) 6а (30 m); д) 8а (40 m)

Обсуждение

Для относительно прямолинейных неразветвленных и врезанных русел контур россыпи – это узкие ленточные залежи с наибольшей концентрацией металла в русловых отложениях [20]. Рационально проводить разведку с заложением разведочных линий, в том числе геофизических профилей, по нормали к направлению палеорусел.

Нами определено, что проследить форму палеорусла шириной 4а с пологими излучинами и степенью развитости от 1,1 до 1,4 можно только до момента, пока у не превышает 6а, что соответствует интервалу 30 м между профилями при шаге между электродами 5 м. Моделирование показало, что при поисковых геофизических работах у может быть увеличено до 10а, что при шаге между электродами 5 м соответствует масштабу 1:5000, когда дистанция между профилями составляет 50 м.

Таким образом, расстояние между профилями должно быть таким, чтобы на один шаг излучины приходилось не менее 6 профилей на оценочной стадии работ и не менее 4 профилей на стадии поисковых работ.

Очевидно, что для русел шириной более 4а интервал между профилями может быть увеличен для повышения рентабельности геофизических исследований. С ростом степени развитости реки до значения 2 необходимо уменьшать величину у между профилями, чтобы не пропустить излучину. Для русел с петлеобразными ($l/L > 2$; $l = 2,8h_w$; $r = 3,8b_p$; $L/h_w > 1$) и синусоидальными ($l/L > 2$; $l = 2,5h_w$; $r = 2b_p$; $L/h_w > 1$) излучинами, когда их крылья длиннее, чем шаг излучины, сеть необходимо располагать вдоль направления оси реки.

Численным моделированием подтверждено, что метод ЭТ позволяет оконтуривать в плане высокоомные отложения извилистого палеорусла. Однако на картах, полученных на основе синтетических данных, палеорусло выделяется более отчетливо на фоне вмещающей среды из-за однородного геоэлектрического строения отложений в модели и отсутствия естественных геологических шумов. Без априорной

информации о контуре палеорусла по данным численного моделирования (рис. 8, з) можно восстановить контур русла на карте, по данным физического эксперимента (рис. 7, з) – затруднительно. Если бы наши выводы основывались только на результатах численного моделирования, мы могли бы сделать ложные выводы о более высокой разрешающей способности метода ЭТ при разреженной сети наблюдений.

Заключение

В настоящее время применение метода электромографии, несмотря на его эффективность при поисках россыпного золота, не регламентировано нормативной документацией, до сих пор не обоснованы методика и выбор масштабов работ. Проведённое исследование отчасти восполняет недостающую информацию и объясняет, какой масштаб полевых исследований выбрать для решения поставленной геологической задачи при относительно малых затратах.

В методе ЭТ принято, что для получения качественной трёхмерной геоэлектрической модели расстояние между профилями не должно превышать четырёхкратное расстояние между электродами, что на практике при межэлектродном шаге 5 м соответствует расстоянию 20 м. Такая плотная сеть наблюдений повлечет высокие экономические затраты. Одним из путей снижения затрат является разрежение сети наблюдения до допустимого уровня. В ходе физического и численного экспериментов определены параметры оптимальной сети наблюдения для выявления палеорусла. Анализ карт показал, что для определения геометрии палеорусла шириной 20 м масштаб сети геофизических наблюдений должен быть не мельче 1:3000, что соответствует расстоянию 30 м между профилями. Но для повышения экономической эффективности геофизических исследований возможно уменьшение масштаба до 1:5000 с детализацией до масштаба 1:2500 на отдельных участках.

Исследования выполнены при поддержке проекта Программы фундаментальных научных исследований № FWZZ-2022-0024.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Torvela T., Chapman R., Lambert-Smith J. An introduction to recent advances in understanding gold deposits: from orogeny to alluvium: the importance of multi-method approaches and developing a characterization // Geological Society, London, Special Publications. – 2022. – V. 516. – № 1. – P. 1–14.
2. Методика разведки россыпей золота и платиноидов / Ю.С. Будилин, Н.А. Васько, В.А. Джобадзе, И.А. Зуев, С.С. Кальниченко, Л.П. Кашеев, А.Г. Мочалов. – М.: ЦНИГРИ, 1992. – 307 с.
3. Билибин Ю.А. Основы геологии россыпей. – М.: Изд-в АН СССР, 1955. – 117 с.
4. Goldfarb Y.I. Dynamic classification of alluvial gold placers in the northeast of Russia // Geology of Ore Deposits. – 2007. – V. 49. – P. 241–270.
5. Виноградова О.В., Хмелева Н.В. Русловые процессы и формирование аллювиальных россыпей золота. – М.: МГУ, 2009. – 171 с.
6. Electrical resistivity ground imaging (ERGI): a new tool for mapping the lithology and geometry of channel-belts and valley-fills / D. Baines, D.G. Smith, D.G. Froese, P. Bauman, G. Nimeck // Sedimentology. – 2002. – V. 49. – № 3. – P. 441–449.
7. Bedrock detection beneath river terrace deposits using three-dimensional electrical resistivity tomography / J.E. Chambers, P.B. Wilkinson, D. Wardrop, A. Hameed, I. Hill, C. Jeffrey, M.H. Loke, P.I. Meldrum, O. Kuras, M. Cave, D.A. Gunn // Geomorphology. – 2012. – V. 177. – P. 17–25.
8. Ismail N., Yanis M., Asyqari A. The use of magnetic and geoelectrical methods to locate buried ancient artificial canals and wells around the cultural heritage of Indrapatra Fort, Aceh, Indonesia // Geosciences Journal. – 2023. – V. 27. – № 1. – P. 67–76.
9. Imaging and locating paleo-channels using geophysical data from meandering system of the Mun River, Khorat Plateau, Northeastern Thailand / P. Nimnate, T. Thitimakorn, M. Choowong, K. Hisada // Open Geosciences. – 2017. – V. 9. – № 1. – P. 675–688.
10. Пустозеров М.Г., Тригубович Г.М. Возможности электромографии ВП при поисках и оценке россыпей золота в Восточных Саянах // Вопросы естествознания. – 2017. – № 1. – С. 70–81.
11. Geophysical survey of deep alluvial gold in terms of Bolotisty Deposit / I.Y. Rasskazov, N.G. Shkabarnya, V.S. Litvintsev, G.N. Shkabarnya // Eurasian Mining. – 2017. – V. 2. – P. 3–7.

12. Mohamed-Ali M.A., Ibrahim S.A. Geophysical and geochemical exploration of the gold bearing placer deposits in the Southern Blue Nile (Sudan) // On Significant Applications of Geophysical Methods: Proceedings of the 1st Springer Conference of the Arabian Journal of Geosciences (CAJG-1). – Tunisia, 2018. – Cham: Springer International Publ., 2019. – P. 147-150.
 13. Оленченко В.В., Осипова П.С. Электротомография аллювиальных отложений при поисковых работах на россыпное золото // Геология и геофизика. – 2022. – Т. 63. – № 1. – С. 117–129.
 14. Давыдов В.А., Бакаев В.П. Геофизика на россыпных месторождениях золота // Разведка и охрана недр. – 2012. – № 4. – С. 41–47.
 15. Никитин А.А., Хмелевской В.К. Комплексирование геофизических методов. – Тверь: ГЕПС, 2004. – 294 с.
 16. Gharibi M., Bentley L.R. Resolution of 3-D electrical resistivity images from inversions of 2-D orthogonal lines // Journal of Environmental and Engineering Geophysics. – 2005. – V. 10. – № 4. – P. 339–349.
 17. Kuneš J. Similarity and modeling in science and engineering. – Cambridge: Springer, 2012. – 440 с.
 18. Основы теории и техники физического моделирования и эксперимента / Н.Ц. Гатапова, А.Н. Колиух, Н.В. Орлова, А.Ю. Орлов. – Тамбов: Изд-во ТГТУ, 2014. – 77 с.
 19. Геоэлектрические признаки рекультивированных отработанных россыпных месторождений золота / П.С. Осипова, В.В. Оленченко, А.С. Калганов, А.В. Чекрызов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333. – № 5. – С. 158–167.
 20. Чалов П.С. Русловые процессы (русловедение). – М.: ИНФРА-М, 2016. – 565 с.
 21. Loke M.H. RES2DINV-rapid 2D resistivity and IP inversion using the least-squares method. Geotomo Software Manual. – Penang, Malaysia, 2018. – 145 p.
 22. Loke M.H. RES3DINV-rapid 3D resistivity and IP inversion using the least-squares method. Geotomo Software Manual. – Penang, Malaysia, 2018. – 110 p.
 23. Kaminsky A.E. ZondRes3D: software for two-dimensional interpretation of DC resistivity and IP data. – Saint-Petersburg, 2010. – 97 p.
 24. Loke M.H. Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys. Geotomo Software Tutorial. – Penang, Malaysia, 2022. – 237 p.
 25. Loke M.H., Dahlin T. Methods to reduce banding effects in 3-D resistivity inversion // Near Surface 2010-16th EAGE European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics. – Zurich, Switzerland: EAGE Publications BV, 2010. – P. 164-00016
- Поступила: 30.03.2023 г.
Прошла рецензирование: 13.04.2023 г.*

Информация об авторах

Осипова П.С., младший научный сотрудник Института нефтегазовой геологии и геофизики им А.А. Трофимука СО РАН.

Оленченко В.В., кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник Института нефтегазовой геологии и геофизики им А.А. Трофимука СО РАН.

Чекрызов А.В., инженер Института нефтегазовой геологии и геофизики им А.А. Трофимука СО РАН.

UDC 550.379

DETERMINATION OF OPTIMAL OBSERVATION NETWORK PARAMETERS FOR MAPPING PALEOCHANNEL BY THE ELECTRICAL RESISTIVITY TOMOGRAPHY METHOD BASED ON NUMERICAL AND PHYSICAL MODELING

Polina S. Osipova¹,
OsipovaPS@ipgg.sbras.ru

Vladimir V. Olenchenko¹,
OlenchenkoVV@ipgg.sbras.ru

Andrey V. Chekryzhov¹,
ChekryzhovAV@ipgg.sbras.ru

¹ Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS,
3, Koptug avenue, Novosibirsk, 630090, Russia.

The relevance of the study is explained by the need to determine the methodological features of applying the electrical resistivity tomography method to map paleochannels when prospecting for placer gold.

The main aim: to determine the necessary and enough parameters of the observation network for paleochannel mapping based on numerical and physical modeling.

Object: electrical fields on the physical and numerical model of the paleochannel.

Methods: electrical resistivity tomography, physical experiment, numerical simulation.

Results. Electrical soundings by electrical tomography were carried out on a physical model of a river valley. In addition, a numerical experiment was performed on a three-dimensional model of a river valley fragment with a paleochannel. The unit of the survey scale is the distance between two electrodes, which in the experiment is 1 cm and is equivalent to 5 m in real field studies. The distance between the profiles varied from 2 to 12 cm with a step of 2 cm, which corresponds to different survey scales. In accordance with geological concepts, the authors formed a model of a river valley with a segmentally gently stage of channel formation. Three-dimensional inversion was carried out for the data set obtained at the maximum density of the observation network, and then for the data sparse to the desired scale. On the resistivity map, the paleochannel is recognized by a ribbon-shaped high-resistivity anomaly. The analysis of the maps showed that to determine the shape of the paleochannel in plan, it is necessary to use the observation network scale of 1:3000, at which the distance between the profiles is 30 m. The physical experiment results were confirmed by mathematical modeling. The scale should be reduced to 1:5000 with detailing in individual areas to improve the economic efficiency of geophysical research.

Key words:

paleochannel, electrical resistivity tomography, optimal geophysical network, physical modeling, alluvial gold placer.

The study was supported by the project of the Program of basis research no. FWZZ-2022-0024.

REFERENCES

- Torvela T., Chapman R., Lambert-Smith J. An introduction to recent advances in understanding gold deposits: from orogeny to alluvium: the importance of multi-method approaches and developing a characterization. *Geological Society, London, Special Publications*, 2022, vol. 516, no. 1, pp. 1–14.
- Budilin Yu.S., Vashko N.A., Dzhobadze V.A., Zuev I.A., Kalnichenko S.S., Kashheev L.P., Mochalov A.G. *Metodika razvedki rossypey zolota i platinoydov* [Methods of prospecting for placers of gold and platinoids]. Moscow, TsNIGRI Publ., 1992. 307 p.
- Bilibin Yu.A. *Osnovy geologii rossypey* [Principles of Placer Geology]. 2nd ed. Moscow, USSR Academy of Sciences Publ., 1955. 117 p.
- Goldfarb Y.I. Dynamic classification of alluvial gold placers in the northeast of Russia. *Geology of Ore Deposits*, 2007, vol. 49, pp. 241–270.
- Vinogradova O.V., Khmeleva N.V. *Ruslovyte protsessy i formirovaniye allyuvialnykh rossypey zolota* [Channel processes and formation of alluvial placers of gold]. Moscow, MSU Publ., 2009. 171 p.
- Baines D., Smith D.G., Froese D.G., Bauman P., Nimeck G. Electrical resistivity ground imaging (ERGI): a new tool for mapping the lithology and geometry of channel-belts and valley-fills. *Sedimentology*, 2002, vol. 49, no. 3, pp. 441–449.
- Chambers J.E., Wilkinson P.B., Wardrop D., Hameed A., Hill I., Jeffrey C., Loke M.H., Meldrum P.I., Kuras O., Cave M., Gunn D.A. Bedrock detection beneath river terrace deposits using three-dimensional electrical resistivity tomography. *Geomorphology*, 2012, vol. 177, pp. 17–25.
- Ismail N., Yanis M., Asyqari A. The use of magnetic and geoelectrical methods to locate buried ancient artificial canals and wells around the cultural heritage of Indrapatra Fort, Aceh, Indonesia. *Geosciences Journal*, 2023, vol. 27, no. 1, pp. 67–76.
- Nimnate P., Thitimakorn T., Choowong M., Hisada K. Imaging and locating paleo-channels using geophysical data from meandering system of the Mun River, Khorat Plateau, Northeastern Thailand. *Open Geosciences*, 2017, vol. 9, no. 1, pp. 675–688.
- Pustozarov M.G., Trigubovich G.M. Effectiveness of IP electrical tomography in search and assessment of alluvial gold in the Eastern Sayan mountains. *Questions of Natural Science*, 2017, no. 1, pp. 70–81. In Rus.
- Rasskazov I.Y., Shkabarnya N.G., Litvintsev V.S., Shkabarnya G.N. Geophysical survey of deep alluvial gold in terms of Bolotisty Deposit. *Eurasian Mining*, 2017, vol. 2, pp. 3–7.
- Mohamed-Ali M.A., Ibrahim S.A. Geophysical and geochemical exploration of the gold bearing placer deposits in the Southern Blue Nile (Sudan). *On Significant Applications of Geophysical Methods. Proceedings of the 1st Springer Conference of the Arabian Journal of Geosciences (CAJG-1)*. Tunisia 2018. Cham, Springer International Publ., 2019. pp. 147–150.
- Olenchenko V.V., Osipova P.S. Electrical resistivity tomography of alluvial deposits during prospecting for placer. *Russian Geology and Geophysics*, 2022, vol. 63, no. 1, pp. 98–108.
- Davydov V.A., Bakaev V.P. Geophysics for placer gold deposits. *Prospect and protection of mineral resources*, 2012, no. 4, pp. 41–47. In Rus.

15. Nikitin A.A., Khmelevskoy V.K. *Kompleksirovanie geofizicheskikh metodov* [Integration of geophysical methods]. Tver, GERS Publ., 2004. 294 p.
16. Gharibi M., Bentley L.R. Resolution of 3-D electrical resistivity images from inversions of 2-D orthogonal lines. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 2005, vol. 10, no. 4, pp. 339–349.
17. Kuneš J. *Similarity and modeling in science and engineering*. Cambridge, Springer, 2012. 439 p.
18. Gatapova N.C., Koliuh A.N., Orlova N.V., Orlov A.Tu. *Osnovy teorii i tekhniki fizicheskogo modelirovaniya i eksperimenta* [Fundamentals of the theory and technology of physical modeling and experiment]. Tambov, TGTU Publ., 2014. 77 p.
19. Osipova P.S., Olenchenko V.V., Kalganov A.S., Chekryzhov A.V. Geoelectric attributes of reclaimed post-mining placer gold deposits. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, no. 5, pp. 158–167. In Rus.
20. Chalov R.S. *Ruslovyie protsessy (ruslovedenie)* [Channel processes (channel science)]. Moscow, INFRA-M Publ., 2016. 565 p.
21. Loke M.H. *RES2DINV-rapid 2D resistivity and IP inversion using the least-squares method. Geotomo Software Manual*. Penang, Malaysia, 2018. 145 p.
22. Loke M.H. *RES2DINV-rapid 3D resistivity and IP inversion using the least-squares method. Geotomo Software Manual*. Penang, Malaysia, 2018. 110 p.
23. Kaminsky A.E. *ZondRes3D: software for two-dimensional interpretation of DC resistivity and IP data*. St Petersburg, 2010. 97 p.
24. Loke M.H. *Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys. Geotomo Software Tutorial*. Penang, Malaysia, 2022. 237 p.
25. Loke M.H., Dahlin T. Methods to reduce banding effects in 3-D resistivity inversion. *16th EAGE European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics*. Zurich, Switzerland, EAGE Publications BV, 2010. pp. 164-00016.

Received: 30 March 2023.

Reviewed: 13 April 2023.

Information about the authors

Polina S. Osipova, junior researcher, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS.

Vladimir V. Olenchenko, Cand. Sc., leading researcher, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS.

Andrey V. Chekryzhov, engineer, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS.

УДК 536.7:556.5:54-4:628.16(470.21)

ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ПИТЬЕВОЙ ВОДЫ В РЕЗУЛЬТАТЕ ВОДОПОДГОТОВКИ (С. ЛОВОЗЕРО, КОЛЬСКИЙ ПОЛУОСТРОВ)

Мазухина Светлана Ивановна¹,
simazukhina@mail.ru

Дрогобужская Светлана Витальевна²,
s.drogobuzhskaia@ksc.ru

Сандимиров Сергей Степанович¹,
sand1966@rambler.ru

Маслобоев Владимир Алексеевич¹,
v.masloboev@ksc.ru

¹ Институт проблем промышленной экологии Севера – обособленное подразделение
Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр Российской академии наук»,
Россия, 184209, г. Апатиты, Академгородок, 14а.

² Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья им. И.В. Тананаева –
обособленное подразделение Федерального исследовательского центра
«Кольский научный центр Российской академии наук»,
Россия, 184209, г. Апатиты, Академгородок, 26а.

Актуальность. Очистка сточных и питьевых вод – важнейшая и актуальная экологическая задача предприятий. Анализ научной литературы позволяет сделать вывод о необходимости применять методы очистки и утилизации вод либо разрабатывать схему для каждого конкретного водного объекта с учетом его физико-химических характеристик и ионного состава. Считается, что реагенты, введенные при водоподготовке воды, не изменяют ее химический состав, однако отсутствие расширенного химического анализа ставит под сомнение неизменность химического состава воды.

Цель: оценка изменения химического состава вод питьевого водоснабжения с. Ловозеро (Мурманская область) в результате водоподготовки с помощью физико-химического моделирования (ПК «Селектор»).

Объекты: пробы вод р. Вирма и питьевых вод центрального водоснабжения (столовая, колонка) с. Ловозеро, отобранные в ноябре 2021 г.

Методы: масс-спектрометрия с индуктивно связанной плазмой (ELAN 9000 DRC-е, Перкин Элмер, США), потенциометрия (Эксперт-001, Россия) и титриметрия. Термодинамические расчеты выполнены с помощью метода физико-химического (термодинамического) моделирования, реализованного в программном комплексе (ПК «Селектор»).

Результаты. С помощью мониторинга и физико-химического моделирования (ПК «Селектор») природных вод реки Вирма и вод центрального водоснабжения (с. Ловозеро, Мурманская область) дана оценка влияния реагентов, применяемых в результате водоподготовки, на химию воды. Показано, как вид реагента и его количество (коагулянт, жидкий хлор, сода и гипохлорит натрия (NaOCl)) оказывают влияние на значения pH, Eh, химический состав воды, состав новообразованных фаз. Образование катионов и анионов редкоземельных элементов при различных концентрациях жидкого хлора указывает на возможность создания селективного способа очистки вод от РЗЭ на сорбентах разного типа или же использования этих свойств при обогащении руд. Замена реагентов на твердую соль NaOCl упрощает процесс водоподготовки, однако не приближает химический состав воды к нормативам, применяемым для бутилированных вод и не делает ее более полезной по макрокомпонентам.

Ключевые слова:

Термодинамическое моделирование, природные и питьевые воды, реагенты, водоподготовка, РЗЭ, уран.

Введение

Очистка сточных и питьевых вод – важная и актуальная экологическая задача [1, 2]. Анализ научной литературы по очистке и переработке вод позволяет сделать вывод о необходимости применять методы очистки либо утилизации вод и разрабатывать схему для каждого конкретного водного объекта с учетом его физико-химических характеристик и ионного состава [1, 3, 4]. Способы очистки вод можно условно поделить на механические (фильтрация) и комбинированные, когда технологическая линия включает механическое отстаивание под действием коагулянтов, хлорирование, фильтрование и стабилизацию кислотности среды (регулирование pH) [1, 5]. Полагают, что

реагенты, которые вводят при водоподготовке, не изменяют химический состав воды. Как правило, в качестве коагулянтов применяют соли алюминия и железа [5]. При этом расширенный химический анализ воды, предназначенной для дальнейшего употребления, до и после обработки коагулянтами, не проводят, что ставит под сомнение неизменность химического состава очищенной воды.

В рамках данной работы на примере результатов мониторинга природных вод р. Вирмы и вод центрального водоснабжения с. Ловозеро (Мурманская область) была проведена оценка влияния реагентов, применяемых в результате водоподготовки на химический состав питьевых вод.

Вода из водозабора (р. Вирма) характеризуется высоким природным содержанием железа, цветностью и мутностью. По данным исследований химического состава воды, выполненных ГОУП «Оленегорскводоканал» и ФГУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии в Мурманской области в г. Мончегорске, г. Оленегорске и Ловозерском районе» из водозабора и распределительной сети сельского поселения Ловозеро [6], сделано следующее заключение: вода из реки Вирмы не соответствует требованиям Руководства по обеспечению качества питьевой воды. В настоящее время износ сетей составляет 93 %.

Существующая схема обработки воды центрального водоснабжения с. Ловозеро включает в себя фильтрование, коагулирование и хлорирование [7]. Обеззараживание происходит коагулянтном полиоксихлоридом алюминия марки «АКВА-АУРАТ» и жидким хлором в соответствии с требованиями ГОСТ (поставщик АООТ «Каустик» г. Волгоград), pH воды стабилизируется раствором кальцинированной соды с концентрацией 50 г/л.

Цель данной работы – оценка изменения химического состава вод питьевого водоснабжения с. Ловозеро (Мурманская область) в результате водоподготовки с помощью физико-химического моделирования (ПК «Селектор»).

Материалы и методы

В работе были использованы результаты анализа проб воды с определением полного химического состава вод с привлечением прецизионных методов анализа – масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ELAN 9000 DRC-e, Перкин Элмер,

США), потенциометрии (Эксперт-001, Россия) и титриметрии. Концентрации фтора были определены с помощью термодинамических расчетов по методике, представленной в работе [8], они сопоставимы с результатами анализов природных объектов Хибинского массива [9].

Все термодинамические расчеты выполнены с помощью метода физико-химического (термодинамического) моделирования, реализованного в программном комплексе (ПК «Селектор»), разработанном под руководством профессора И.К. Карпова (Институт геохимии им. Виноградова СО РАН, г. Иркутск). ПК снабжен системой встроенных баз термодинамических данных, оснащен модулем формирования моделей различной сложности [9]. В физико-химическую модель включены 42 независимых компонента (Al, B, Br, Ar, He, Ne, C, Ca, Cl, F, Fe, K, Mg, Mn, N, Na, P, S, Si, Sr, Cu, Zn, Ni, Pb, V, Ba, U, Ag, Au, Co, Cr, Hg, As, Cd, Mo, Se, La, Ce, Zr, H, O, e), 1062 зависимых компонентов, в том числе, в водном растворе – 435, в газовой фазе – 76, жидких углеводородов – 111, твердых фаз, органических и минеральных веществ – 440. Набор твердых фаз мультисистемы сформирован с учетом минерального состава горных пород Балтийского щита [10–12]. В настоящей работе ПК используется также для моделирования в системе «вода–реагент».

Результаты и обсуждение

Объекты исследования. На рис. 1 представлены станции отбора проб воды в ноябре 2021 г. – пробы вод р. Вирмы и питьевых вод центрального водоснабжения (столовая, колонка) [6].



Рис. 1. Станции отбора проб воды: 1 – р. Вирма (водозабор с. Ловозеро); 2 – столовая в с. Ловозеро; 3 – колонка в с. Ловозеро

Fig. 1. Water sampling stations: 1 – Virma river (Lovozero village water intake); 2 – dining room in Lovozero village; 3 – pump in Lovozero village

В табл. 1 представлены аналитические данные и результаты моделирования вод р. Вирмы и питьевой воды (столовая).

Анализ результатов (табл. 1) показывает, что после проведения водоподготовки в воде увеличиваются концентрации Al, Na и HCO_3^- .

Таблица 1. Аналитические данные (АД) и результаты моделирования (РМ) природных и питьевых вод (в мг/л), ноябрь 2021 г

Table 1. Analytical data (AD) and simulation results (SR) of natural and drinking waters (mg/l), November 2021

Показатель Indicator	Река Вирма Virma River		Столовая с. Ловозеро Dining room in Lovozero		Показатель Indicator	Река Вирма Virma River		Столовая с. Ловозеро Dining room in Lovozero	
	АД AD	РМ SR	АД AD	РМ SR		АД AD	РМ SR	АД AD	РМ SR
Eh, V		0,828		0,754	Ва сум	0,0047	4,71E-03	5,56E-03	5,56E-03
pH	6,67	6,667	7,98	7,97	Ba ²⁺		4,71E-03		5,56E-03
Is(ион.сила)		0,000575		0,001367	BaCO ₃		1,53E-07		9,12E-06
Alсум	0,057	5,71E-02	0,291	2,91E-01	BaCl ⁺		1,00E-07		5,77E-07
Al(OH) ₂ ⁺		1,17E-03		5,43E-05	BaOH ⁺		4,25E-10		9,61E-09
Al(OH) ₂ F		9,16E-02		2,49E-03	Si сум	6,31	6,31	6,10	6,10
Al(OH) ₂ F ₂ ⁻		2,03E-04		3,38E-06	SiO ₂		4,48		4,30
AlO ₂ ⁻		1,77E-02		3,31E-01	HSiO ₃ ⁻		6,29E-03		1,23E-01
HAIO ₂		1,40E-02		1,28E-02	H ₂ SiO ₄		1,44E+01		1,38E+01
Al(OH) ₂ ²⁺		2,74E-04		6,59E-07	Sr сум	0,033	3,32E-02	0,042	4,22E-02
Al(OH) ₃		1,22E-02		1,11E-02	Sr ²⁺		3,31E-02		4,17E-02
Al(OH) ₄ ⁻		2,42E-02		4,53E-01	SrOH ⁺		5,19E-09		1,25E-07
Al ³⁺		4,63E-06		6,04E-10	SrCO ₃		2,07E-06		1,32E-04
Ca сум	3,06	3,06E+00	3,36	3,36	SrHCO ₃ ⁺		2,45E-04		7,86E-04
Ca ²⁺		3,04E+00		3,31	SrCl ⁺		1,45E-06		8,90E-06
CaOH ⁺		1,74E-06		3,61E-05	SrF ⁺		6,87E-07		4,93E-07
CaCO ₃		8,33E-04		4,56E-02	Zn сум	<0,00001		<0,00001	
Ca(HCO ₃) ⁺		2,50E-02		6,92E-02	Cd сум	0,00003	2,80E-05	0,00004	3,65E-05
CaHSiO ₃ ⁺		7,22E-06		1,44E-04	Cd ²⁺		2,78E-05		3,53E-05
CaCl ⁺		1,62E-04		8,59E-04	CdCl ⁺		2,07E-07		1,28E-06
CaCl ₂		6,80E-09		1,82E-07	CdO		1,45E-12		6,98E-10
CaF ⁺		2,65E-04		1,64E-04	CdOH ⁺		8,58E-09		2,08E-07
CaSO ₄		2,58E-02		2,27E-02	Ni сум	<0,00001		<0,00001	
B сум	0,0095	9,50E-03	0,0092	9,21E-03	Pb сум	0,00006	6,35E-05	0,00035	3,45E-04
B(OH) ₃		5,42E-02		5,03E-02	Pb ²⁺		1,57E-05		5,80E-06
BO ₂ ⁻		8,74E-05		1,66E-03	PbOH ⁺		5,17E-05		3,67E-04
Fe сум	0,76	7,60E-01	0,251	2,55E-01	PbO		2,36E-09		3,31E-07
Fe ²⁺		7,29E-10		9,35E-13	PbCl ⁺		2,83E-08		5,11E-08
FeSO ₄ ⁺		5,15E-09		2,79E-12	Cu сум	0,0003	2,86E-04	0,0016	1,59E-03
Fe(OH) ₃		7,03E-02		4,16E-02	Cu ⁺		6,73E-16		3,92E-14
Fe(OH) ₄ ⁻		1,77E-03		1,11E-02	Cu ²⁺		2,75E-04		8,94E-04
FeOH ²⁺		3,15E-04		1,80E-06	CuCl ⁺		6,19E-08		9,84E-07
FeOH ⁺		1,51E-12		8,11E-14	CuOH ⁺		1,40E-05		8,75E-04
FeO ⁺		3,94E-01		2,25E-02	CuF ⁺		1,50E-07		2,80E-07
FeSO ₄		3,32E-12		1,69E-14	CuCl ₂ ⁻		-		2,02E-15
HFeO ₂		6,61E-01		3,91E-01	HCuO ₂ ⁻		4,30E-12		1,08E-07
FeO ₂ ⁻		5,77E-04		3,63E-03	P сум		3,26E-04		3,26E-04
FeCl ⁺		4,69E-14		1,28E-15	PO ₄ ³⁻	0,001	4,51E-10	0,001	3,82E-08
FeF ⁺		3,31E-13		1,01E-15	HPO ₄ ²⁻		2,23E-04		8,66E-04
FeF ²⁺		1,64E-07		5,38E-11	H ₂ PO ₄ ⁻		7,96E-04		1,46E-04
F ⁻		2,46E-01		1,50E-01	Co сум	0,0001		0,0001	1,01E-04
HF		7,45E-05		2,22 E-06	Co ²⁺		9,72E-05		1,00E-04
HF ₂ ⁻		4,33E-10		7,87E-12	CoO		2,01E-10		7,84E-08
K сум	0,41	4,10E-01	0,52	5,20E-01	CoCl ⁺		3,38E-08		1,70E-07
K ⁺		1,16E-07		5,20E-01	HCoO ₂ ⁻		1,86E-16		1,49E-12
KCl		1,16E-07		7,42E-07	CoOH ⁺		3,80E-08		7,50E-07
KHSO ₄		6,48E-09		8,11E-15	Cl сум	2,09		10,9	1,09E+01
KOH		2,15E-04		1,62E-07	Cl ⁻		2,09E+00		1,09E+01
KSO ₄ ⁻		4,10E-01		2,36E-04	HCl		9,59E-08		2,44E-08
Mg сум	1,57	1,57E+00	1,76	1,76	Zr сум	0,0008	7,98E-04	0,00031	3,12E-04
Mg ²⁺		1,56E+00		1,74	HZrO ₃ ⁻		8,13E-04		4,68E-04
MgOH ⁺		1,66E-05		3,54E-04	ZrO ₂		3,63E-04		1,02E-05
MgCO ₃		2,79E-04		1,56E-02	U сум	0,00009	4,55E-05	0,00003	2,87E-05
Mg(HCO ₃) ⁺		1,73E-02		4,91E-02	HUO ₄ ⁻		2,68E-07		3,25E-06
MgCl ⁺		1,62E-04		8,81E-04	UO ₂ ²⁺		6,76E-08		1,06E-10
MgF ⁺		7,88E-04		5,00E-04	UO ₂ OH ⁺		1,50E-06		4,52E-08
MgSO ₄		2,53E-02		2,28E-02	UO ₂		-		-
MgHSiO ₃ ⁺		9,67E-06		1,97E-04	UO ₃		5,29E-05		3,14E-05
Mn сум	0,047	4,67E-02	0,016	2,77E-02	Li сум	0,00025	2,53E-04	0,0005	5,02E-04

Mn ²⁺		4,66E-02		2,76E-02	Li ⁺		2,53E-04		5,02E-04
MnOH ⁺		4,51E-06		5,11E-05	LiOH		6,23E-11		2,45E-09
MnO		3,50E-11		7,85E-09	Ce сум	0,00023	2,26E-04	0,00009	9,10E-05
HMnO ₂ ⁻		-		1,77E-13	Ce ³⁺		1,75E-04		6,52E-05
MnSO ₄		1,97E-04		9,45E-05	CeF ₂ ²⁺		3,58E-05		7,38E-06
MnF ⁺		5,98E-06		2,03E-06	CeF ₂ ⁺		6,06E-07		7,13E-08
MnCl ⁺		2,85E-06		8,23E-06	CeF ₃		1,74E-09		1,21E-10
CO ₃ ²⁻		3,56E-03		2,05E-01	CeF ₄ ⁻		2,43E-12		1,03E-13
HCO ₃ ⁻	15,7	1,82E+01	50,3	4,96E+01	CeHCO ₃ ²⁺		5,74E-06		5,27E-06
SO ₄ ²⁻	2,03	1,99	1,88	1,84	CeO ₂ H		3,11E-11		8,12E-08
HNO ₃		5,55E-12		2,87E-11	CeSO ₄ ⁺		2,24E-05		6,35E-06
NO ₃ ⁻	0,001	7,71E-04	0,08	8,15E-02	CeOH ²⁺		1,91E-06		1,32E-05
Na ⁺	2,62	2,62	19,9	1,99E+01	La сум	0,00015	1,54E-04	0,00008	7,97E-05
NaOH		9,06E-08		1,36E-05	La ³⁺		7,65E-05		1,98E-06
NaAlO ₂		4,72E-07		6,47E-05	LaCO ₃ ⁺		9,06E-05		1,11E-04
NaCl		6,30E-05		2,41E-03	LaF ₂ ²⁺		6,60E-06		9,43E-08
NaF		5,89E-06		2,64E-05	LaO ⁺				3,74E-09
NaSO ₄ ⁻		1,35E-03		8,82E-03	LaO ₂ H		2,25E-13		4,08E-11
NaHSiO ₃		7,28E-05		1,05E-02	LaOH ²⁺		5,05E-07		2,42E-07
O ₂		6,10		7,93	LaSO ₄ ⁺		9,89E-06		1,94E-07
CO ₂		6,61		8,79E-01	LaF ₂ ⁺		6,68E-08		5,45E-10
V сум	0,0007	7,37E-04	0,0008	7,73E-04	Ag сум	0,0013	1,34E-03	0,0013	1,30E-03
VO ₂ ⁺		2,40E-08		3,07E-12	Ag ⁺		5,54E-08		1,08E-09
VO ₄ ³⁻		3,39E-10		8,08E-09	AgNO ₃		6,29E-04		1,26E-03
HVO ₄ ²⁻		1,61E-03		1,76E-03					
H ₃ VO ₄		6,68E-05		1,69E-07					

С помощью физико-химического моделирования рассмотрены различные сценарии взаимодействия «вода–реагент» при водоподготовке (реагент – 10%-й раствор полиоксихлорида алюминия, жидкий хлор и 5%-й раствор соды) без выпадения твердых фаз (метастабильное состояние) и с выпадением твердых фаз (равновесное состояние). При необходимости очист-

ки холодной воды, содержащей большое количество природных органических примесей, чаще отдают предпочтение полиоксихлориду алюминия (по сравнению с другими реагентами) [13]. Химическая формула применяемого реагента – $Al(OH)_A Cl_B \cdot nH_2O$, где $A+B=3$, при $A \geq 1,3$. В наших расчетах использовали $A=1,3$; $B=1,7$.

Таблица 2. Химический состав 10%-го раствора полиоксихлорида алюминия $Al(OH)_{1,3}Cl_{1,7}$, $T=5^\circ C$

Table 2. Chemical composition of 10 % aluminum polyoxochloride solution $Al(OH)_{1,3}Cl_{1,7}$, $T=5^\circ C$

Концентрация, мг/л/Concentration, mg/l									
pH	Eh, В/В	Cl ⁻	Al(OH) ₂ ⁺	Al ³⁺	HAIO ₂	Al(OH) ₂ ⁺	Al(OH) ₄ ⁻	Al(OH) ₃	AlO ₂ ⁻
6,07	-0,216	6,10E+04	1,42E+04	9,47E+03	8,30E+03	5,22E+03	4,50E+03	3,96E+03	9,64E+02

На рис. 2 представлена блок-схема существующей водоподготовки, а в табл. 2 представлены формы нахождения алюминия в 10 %-ном растворе полиоксихлорида алюминия при температуре 5 °С.

Анализ результатов (табл. 2) показывает, что в этой слабкокислой восстановительной среде отмечается высокая концентрация Cl⁻, а из соединений алюминия преобладает Al(OH)₂⁺. Среди наиболее токсичных его форм выделяют свободные (гидратированные) ионы или аквакомплексы $[Al(H_2O)_6]^{3+}$, гидроксокомплексы Al(OH)₂⁺ и Al(OH)₂⁺, существующие в слабкокислой среде при pH 4,5–5,5 [14]. Согласно исследованиям [15] установленные формы миграции Al(OH)₂⁺, Al³⁺ являются наиболее токсичными для растений.

Результаты взаимодействия 10%-го раствора полиоксихлорида с 1000 л воды р. Вирмы при температуре 5 °С и формы миграции алюминия и их концентрации показаны в табл. 3.

Согласно данным табл. 3, при добавлении коагулянта более 0,01 л в систему изменяются значения pH, Eh и состав новообразованных фаз, возрастают концентрации алюминия и хлора. При этом начинают преобладать именно токсичные формы алюминия. Изме-

нение концентрации HCO₃⁻ приводит к уменьшению карбонатов и гидрокарбонатов кальция и магния. Рост концентрации хлора приводит к увеличению концентрации хлоридов натрия и кальция, происходит изменение форм миграции лантаноидов и урана.

Полученные результаты показывают опасность передозировки коагулянта. Для дальнейших расчетов использовали объем коагулянта 0,01 л на 1000 л воды как оказавшего наименьшее влияние на химический состав воды (табл. 3).

Обеззараживание хозяйственно-питьевой воды с. Ловозеро производится в хлораторной жидким хлором, соответствующим требованиям ГОСТ (поставщик АООТ «Каустик» г. Волгоград) [7]. Поэтому на следующем этапе исследования изучали взаимодействие речной воды с жидким хлором. В качестве граничных условий модели использовали 1000 л речной воды и жидкий хлор (Cl₂). Результаты моделирования представлены на рис. 3. Полученные результаты указывают: происходит смещение pH в кислую область от 6,8 до 3,04 и рост концентрации хлора в водной среде (рис. 3, б). Изменение концентрации HCO₃⁻ влечет за собой изменение концентрации карбонатов и гидрокарбонатов Ca и Mg.

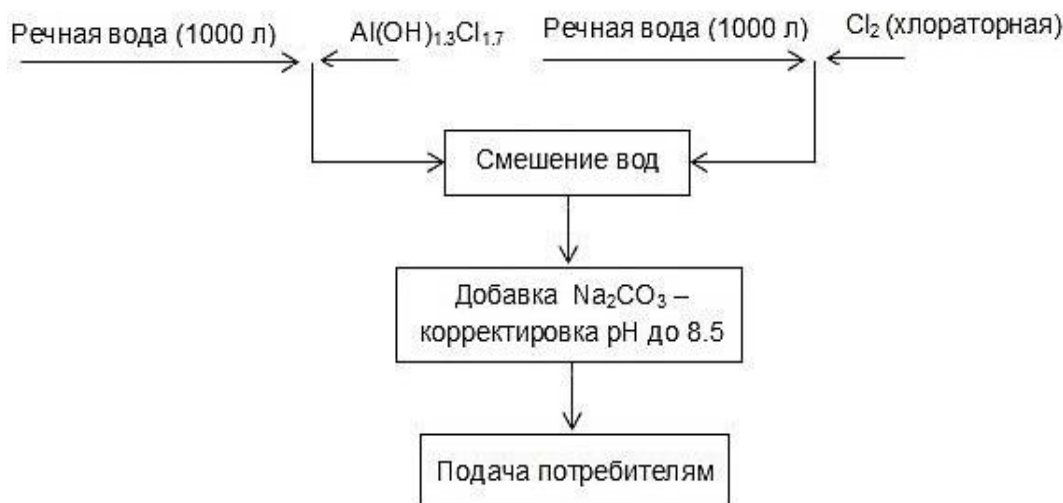


Рис. 2. Схема обработки воды центрального водоснабжения села Ловозеро

Fig. 2. Water treatment scheme of the central water supply of Lovozero village

Таблица 3. Изменение форм миграции алюминия, концентраций Cl^- , HCO_3^- , состав новообразованных фаз при взаимодействии 10%-го раствора полиоксихлорида алюминия с 1000 л воды р. Вирмы, мг/л ($T=5^\circ\text{C}$)

Table 3. Changes in the forms of aluminum migration, Cl^- , HCO_3^- concentrations, composition of newly formed phases during the interaction of a 10 % solution of aluminum polyoxychloride with 1000 liters of water of the Virma river, mg/l ($T=5^\circ\text{C}$)

Формы миграции Forms of migration	10%-й р-р, л / 10 % solution, l					
	0,0001	0,0100	0,03162	0,1000	0,3162	1,0000
$\text{Al(OH)}_2\text{F}$	4,73E-05	5,75E-05	–	3,96E-04	6,42E-02	9,94E-02
HAlO_2	4,55E-06	4,67E-06	–	6,55E-06	3,02E-05	3,02E-05
Al(OH)^{2+}	4,70E-07	6,77E-07	–	2,38E-05	1,82E-01	5,93E-01
Al(OH)_2^+	2,13E-06	2,59E-06	–	1,81E-05	3,34E-03	5,84E-03
Al(OH)_3	3,26E-06	3,35E-06	–	4,70E-06	2,17E-05	2,17E-05
AlSO_4^+	5,47E-11	9,35E-11	–	1,56E-08	4,17E-03	1,84E-02
Al^{3+}	1,85E-08	3,16E-08	–	5,67E-06	1,86E+00	1,20E+01
HCO_3^-	17,7	16,6	–	6,42	0,213	0,130
Cl^-	2,10	2,70	4,03	8,21	21,4	63,3
Eh, В / Eh, V	0,846	0,850	0,858	0,888	0,976	0,989
pH	6,76	6,68	6,53	5,99	4,39	4,17
Новообразованные фазы/Newly formed phases, %						
Al-Si (алюмосиликаты)	3,18	16,66	41,53	92,72	95,88	97,67
SiO_2	85,14	72,3	48,61	–	–	–
FeO(OH)	11,0	10,4	9,29	6,85	3,89	2,19
MnO_2	0,67	0,64	0,57	0,42	0,24	0,13

В это же время отмечается рост концентрации CaCl^+ , уменьшение концентраций CaCO_3 и CaHCO_3^+ , изменяются формы существования редких и РЗЭ – для лантана преобладающим становится La^{3+} вместо LaCO_3^+ (при условии $\text{Cl}_2 > 0,03162$ моль).

В работах [16, 17] с помощью моделирования показано влияние фтора и хлора на растворимость соединений ряда элементов и формы миграции, в том числе U и РЗЭ, в нашей работе мы рассматриваем влияние хлора, который поступает в ходе водоподготовки.

На рис. 3, б–г показаны формы миграции элементов на примере урана, циркония и церия. Анализ результатов указывает на протекание окислительно-восстановительных процессов с изменением заряда ионов: уран во всех формах миграции 6-валентный, вначале преобладает нейтральная форма UO_3 , концентрация которой уменьшается при достижении концентрации хлора 0,1 моль. Дальнейшее увеличение концентрации хлора в системе приводит к увели-

чению содержания заряженного катиона уранила UO_2^{2+} . Для циркония характерна смена от отрицательного иона HZrO_3^- ($0,0001 < \text{Cl}_2 < 0,01$)– ZrO_2 ($0,03162 < \text{Cl}_2 < 0,15849$) до ZrO^{2+} ($0,19953 < \text{Cl}_2$), для церия преобладающей формой миграции является Ce^{3+} .

В настоящее время накопление РЗЭ в биосубстратах человека и их влияние на здоровье человека недостаточно изучены, но ряд авторов считает, что это направление заслуживает внимания [18]. Биоаккумуляция РЗЭ в волосах детей и взрослого населения, а также в других биосредах показана в работах [18–22].

Изменение форм миграции редких элементов указывает на возможность создания селективного способа извлечения РЗЭ на геохимических барьерах – сорбентах разного типа – с целью очистки вод.

Обратим внимание на формы миграции алюминия: в природной воде преобладает форма $\text{Al(OH)}_2\text{F}$ (0,111 мг/л при температуре 5°C), далее, по мере увеличения концентрации хлора до 0,3981 моль и снижения значения pH до 3,34 и концентрации $\text{Al(OH)}_2\text{F}$ до

$8,52 \cdot 10^{-6}$ мг/л, концентрация Al^{3+} возрастает до $5,68 \cdot 10^{-2}$ мг/л, т. е. Al^{3+} становится преобладающей формой миграции алюминия. Именно это значение

хлора и состав хлорной воды были взяты для исследования системы «речная вода – 0,01 л 10%-го $\text{Al}(\text{OH})_{1,3}\text{Cl}_{1,7}$ – хлорная вода (Cl_2 – 0,3981 моль)».

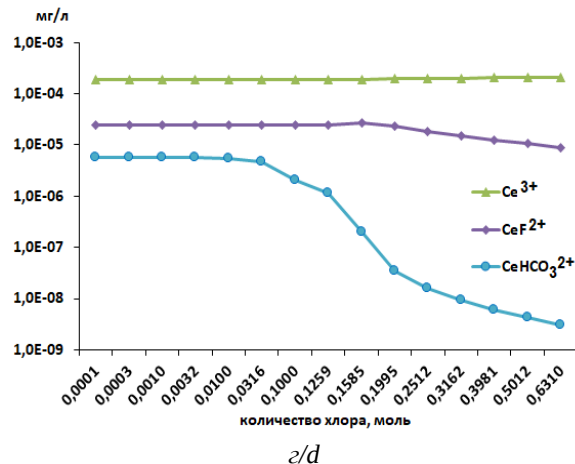
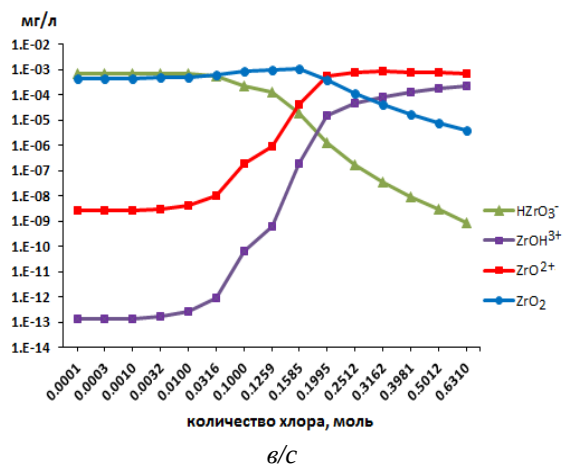
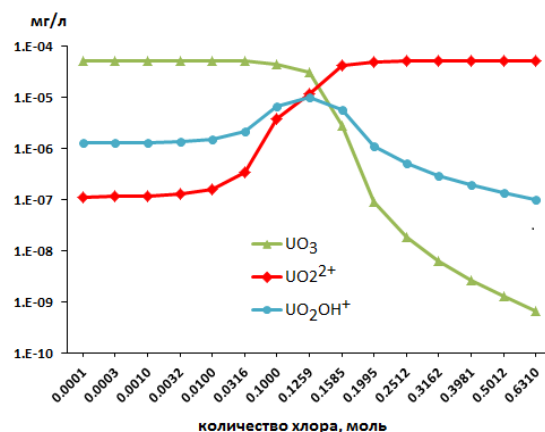
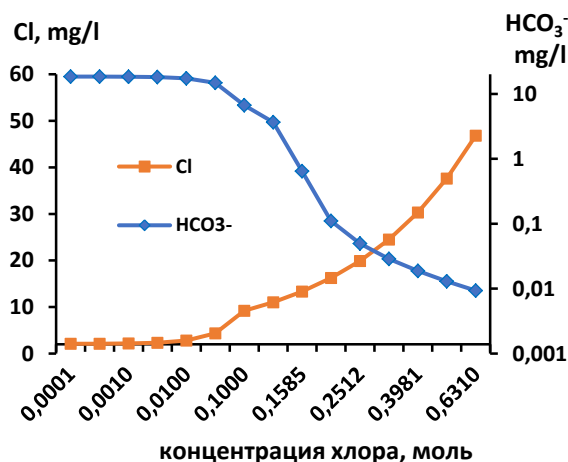


Рис. 3. Изменение концентраций химических элементов (Cl^- , HCO_3^- (а); U (б); Zr (в); Ce (г)) при добавлении в речную воду (р. Вирма) жидкого хлора ($T=5^\circ\text{C}$, $P=1$ бар), мг/л

Fig. 3. Change in concentrations of chemical elements (Cl^- , HCO_3^- (a); U (b); Zr (c); Ce (d)) when adding liquid chlorine to river water (Virma river) ($T=5^\circ\text{C}$, $P=1$ bar), mg/l

Результаты смешения 1000 л речной воды с добавлением 0,01 л 10 %-го раствора коагулянта $\text{Al}(\text{OH})_{1,3}\text{Cl}_{1,7}$ и хлорной воды от 1 до 10000 л представлены на рис. 4.

При смешении более 100 л хлорной воды с речными водами и достижении концентрации хлора более 5 мг/л происходит резкое снижение значения pH, снижение концентрации HCO_3^- и изменение форм миграции всех микроэлементов. Добавление в систему более 1000 л хлорной воды позволяет ряду элементов оставаться в растворенном состоянии (например, Mn и Al), а преобладающей новообразованной фазой остается SiO_2 (рис. 4, б). Состояние системы при смешении 1000 л речной воды с хлорной водой (табл. 4) было зафиксировано добавлением соды для стабилизации значений pH.

В табл. 4 представлены изменения параметров хлорированных речных вод после добавления 5 %-го раствора соды.

Таблица 4. Изменения параметров хлорированных речных вод после добавления 5 %-го раствора соды

Table 4. Changes in the parameters of chlorinated river waters after addition of a 5 % soda solution

5%-й р-р Na_2CO_3 , л 5% Na_2CO_3 solution, l	Eh, В/В	pH	Na^+	Cl^-	HCO_3^-
			мг/л/mg/l		
0	0,997	4,03	2,62	16,5	0,092
1	0,857	6,58	14,0	16,5	23,1
2	0,804	7,54	25,3	16,5	53,0

Физико-химическое моделирование позволяет прогнозировать изменение форм миграции как макро-, так и микрокомпонентов вод и, при необходимости, оптимизировать расход реагентов либо предложить другой тип реагентов. Вместо хлорирования речной воды жидким хлором и дальнейшей ее нейтрализации раствором соды было предложено использовать раствор гипохлорита натрия.

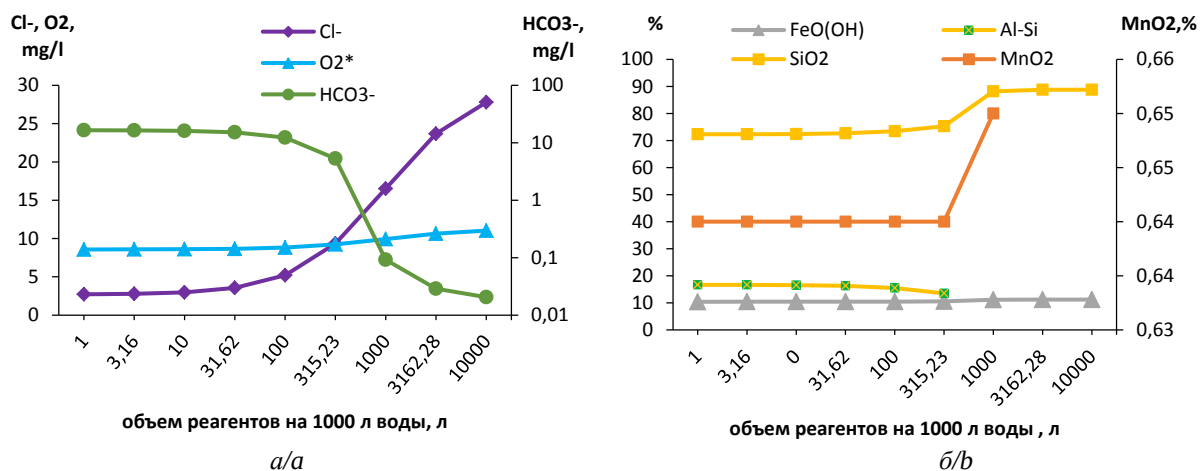


Рис. 4. Изменение концентраций химических элементов Cl^- , O_2 , HCO_3^- (а) и состава новообразованных фаз (б) при смешении речной воды (р. Вирма) с реагентами (Cl_2 , $\text{Al(OH)}_{1,3}\text{Cl}_{1,7}$), Al-Si – алюмосиликаты ($T=5^\circ\text{C}$, $P=1$ бар), мг/л; * – нейтральная форма

Fig. 4. Changes of concentrations of chemical elements Cl^- , O_2 , HCO_3^- (a) and composition of newly formed phases (b) when mixing river water (Virma river) with reagents (Cl_2 , $\text{Al(OH)}_{1,3}\text{Cl}_{1,7}$), Al-Si – aluminosilicates ($T=5^\circ\text{C}$, $P=1$ bar), mg/l; * – neutral form

Таблица 5. Сопоставление концентраций некоторых элементов до и после водоподготовки с водами различных категорий, мг/л

Table 5. Comparison of concentrations of some elements before and after water treatment with waters of various categories, mg/l

Элемент Element	Вода природная (р. Вирма) Natural water (Virma river)	Вода питьевая (столовая) Drinking water (dining room)	Полноценность Usefulness [23]	Предельно допустимые концентрации, СанПиН 2.1.4.1116-02 Maximum permissible concentrations, SanPiN 2.1.4.1116-02 [24]	
				1-я категория 1st category	Высшая категория Higher category
Na	1,88	19,87	2–20	200	20
Mg	1,28	1,31	5–65	65	5–50
Al	0,057	0,29	–	0,2	0,1
K	0,31	0,49	2–20	20	2–20
Ca	1,54	3,07	25–130	130	25–80

Анализ результатов моделирования «1000 л исходной воды р. Вирмы – $\text{Al(OH)}_{1,3}\text{Cl}_{1,7}$ – NaOCl » позволил сделать вывод: добавление NaOCl вместо жидкого хлора не приводит к изменению значений pH, Eh, HCO_3^- , форм миграции макро- и микрокомпонентов. Образование и увеличение концентрации кислорода приводит к окислению элементов и выпадению твердых фаз: FeO(OH) , Al-Si (алюмосиликаты), SiO_2 , MnO_2 . Увеличение концентрации кислорода обычно приводит к окислению элементов и выпадению твердых фаз. При содержании NaOCl 0,31623 моль в системе концентрации составляют, мг/л: Cl^- – 13,9, Na – 9,85, HCO_3^- – 16,6 и pH – 6,68, что соответствует природным значениям воды. При добавлении твердой соли NaOCl нет необходимости добавлять соду для

регулирования значений pH, отпадает необходимость в хлораторной, что упрощает процесс водоподготовки, однако не приближает химический состав воды к нормативам, применяемым для бутилированных вод, и не делает ее более полезной по макрокомпонентам (табл. 5).

Заключение

Являясь необычным веществом нашей планеты и обладая уникальными свойствами, вода – главный фактор глобальной эволюции окружающего мира, она оказывает влияние на геосферно-биосферные системы в целом [25]. В данной работе показано, как в результате водоподготовки (хозяйственной деятельности) меняется химический состав воды, состав новообразованных фаз, а значит, и структура воды [25, 26]. В мировом масштабе такие процессы, связанные с изменением химического состава вод, несомненно окажут влияние и на эволюцию окружающего мира.

В связи с тем, что в последнее время расширяются области применения стратегических металлов (REE, Zr, Hf, Nb, Ta) [27], указанный подход можно применять при разработке, обогащении и извлечении редких и РЗЭ как с целью усовершенствования перечисленных процессов, так и для оценки влияния производства на окружающую среду, в том числе на природные воды (поверхностные и подземные).

Физико-химическое моделирование целесообразно применять при изучении и оптимизации процессов водоподготовки, разработки месторождений и обогащения руд. Предложенный подход позволяет существенно повысить экологическую и промышленную безопасность и снизить эксплуатационные затраты в процессах промышленного и хозяйственного обеспечения горнопромышленного региона водой.

Работа выполнена по темам НИР № 1021051803677-1, FMEZ-2022-0010, FMEZ-2022-0018.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Очистка шахтных вод рудника «Северный» АО «Кольская ГМК» методом электрохимической коагуляции / А.В. Светлов, В.Г. Миненко, А.Л. Самусев, Е.М. Салахов // Цветные металлы. – 2019. – № 11. – С. 52–56. URL: <https://doi.org/10.17580/tsm.2019.11.06>.
2. Disinfection byproduct formation during drinking water treatment and distribution: a review of unintended effects of engineering agents and materials / S. Ding, Y. Deng, T. Bond, C. Fang, Z. Cao, W. Chu // Water Research. – 2019. – V. 160. – P. 313e329. URL: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.05.024> (дата обращения 15.02.2023).
3. Экологически безопасный метод переработки и утилизации минерализованных оборотных вод хвостохранилищ обогащенных фабрик АК «АЛРОСА» / Г.П. Двойченкова, В.Г. Миненко, А.В. Письменный, И.В. Зырянов, Г.Х. Островская // Горный журнал. – 2011. – № 1. – С. 97–100.
4. Zahedi R., Mirmohammadi S.J. Sulfate removal from chemical industries' wastewater using ettringite precipitation process with recovery of Al(OH)₃ // Applied Water Science. – 2022. – V. 12. – P. 226. URL: <https://doi.org/10.1007/s13201-022-01748-7> (дата обращения 15.02.2023).
5. Технологический комплекс очистки сбросных вод горного производства / В.Н. Заостровцев, И.А. Миняева, М.М. Суханевич, А.В. Горев // Горный журнал. – 2014. – № 3. – С. 68–73.
6. ГОСТ Р 56237-2014 (ИСО 5667-5:2006). Вода питьевая. Отбор проб на станциях водоподготовки и в трубопроводных распределительных системах. Дата введения 2016-01-01. – М.: Стандартинформ, 2016. – 23 с.
7. Схема водоснабжения и водоотведения сельского поселения Ловозеро Ловозерского района Мурманской области на 2014–2018 гг. и на период до 2028 г. – Ловозеро: ООО «ЭнергоКонсалт», 2014. – 186 с.
8. Мазухина С.И. Формирование поверхностных и подземных вод Хибинского горного массива. – Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2012. – 173 с.
9. Качество вод Арктической зоны Российской Федерации: физико-химическое моделирование формирования вод, формы миграции элементов, влияние на организм человека / С.И. Мазухина, В.В. Максимова, К.В. Чудненко, В.А. Маслобоев, С.С. Сандимиров, С.В. Дробобужская, П.С. Терещенко, В.И. Пожиленко, А.В. Гудков. – Апатиты: Изд-во ФИЦ КНЦ РАН, 2020. – 158 с.
10. Чудненко К.В. Термодинамическое моделирование в геохимии: теория, алгоритмы, программное обеспечение, приложения. – Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2010. – 287 с.
11. Thermodynamic modeling of hypergene processes in loparite ore concentration tailings / S. Mazukhina, E. Krasavtseva, D. Makarov, V. Maksimova // Minerals. – 2021. – V. 11. – № 9. – P. 996. URL: <https://doi.org/10.3390/min11090996> (дата обращения 15.02.2023).
12. Chemical composition of natural waters of the Lovozero massif, Russia / S.S. Sandimirov, V.I. Pozhilenko, S.I. Mazukhina, S.V. Drogobuzhskaya, A.A. Shirokaya, P.S. Tereshchenko // Model. Earth Syst Environ. – 2022. – № 8. – P. 4307–4315. URL: <https://doi.org/10.1007/s40808-022-01362-1> (дата обращения 15.02.2023).
13. О воде. Как правильно использовать коагулянты для очистки воды? URL: <https://o-vode.net/ochistka/koagulyanty> (дата обращения: 30.08.2022).
14. Линник П.Н., Жежеря В.А. Алюминий в поверхностных водах Украины: содержание, формы миграции, особенности распределения среди абиотических компонентов // Водные ресурсы. – 2013. – Т. 40. – № 2. – С. 165–178.
15. Comparison study of five analytical methods for the fractionation and subsequent determination of aluminium in natural water samples / T. Wickström, N. Clarke, K. Derome, J. Derome, E. Røgeberg // J. Environ. Monit. – 2000. – № 2. – P. 171–181. URL: <https://doi.org/10.1039/a909139d> (дата обращения 15.02.2023).
16. The role of fluorine in hydrothermal mobilization and transportation of Fe, U and REE and the formation of IOCG deposits / Y. Xing, B. Etschmann, W. Liu, Y. Mei, Y. Shvarov, D. Testemale, A. Tomkins, J. Brugger // Chemical Geology. – 2019. – V. 504. – P. 158–176.
17. Hydrothermal transport, deposition, and fractionation of the REE: Experimental data and thermodynamic calculations / A. Migdisov, A.E. Williams-Jones, J. Brugger, F.A. Caporuscio // Chemical Geology. – 2016. – V. 439. – P. 13–42. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemgeo.2016.06.005> (дата обращения 15.02.2023).
18. Health effects and toxicity mechanisms of rare Earth elements – knowledge gaps and research prospects / G. Pagano, M. Guida, F. Tommasi, R. Oral // Ecotoxicol. Environ. Saf. – 2015. – V. 115. – P. 40–48. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2015.01.030
19. Investigation of rare Earth elements in urine and drinking water of children in mining area / Q. Liang, H. Yin, J. Li, L. Zhang, R. Hou, S. Wang // Medicine 97. – 2018. – e12717. DOI: 10.1097/MD.00000000000012717.
20. Prenatal exposure of rare Earth elements cerium and ytterbium and neonatal thyroid stimulating hormone levels: findings from a birth cohort study / Y. Liu, M. Wu, L. Zhang, J. Bi, L. Song, L. Wang, B. Liu, A. Zhou, Z. Cao, C. Xiong, S. Yang, Sh. Xu, W. Xia, Y. Li, Y. Wang // Environ. Int. – 2019. – V. 133. – 105222. DOI: 10.1016/j.envint.2019.105222.
21. Biological monitoring of exposure to rare Earth elements and selected metals in the Inuit population of Nunavik, Canada / C.M. Cirtiu, M. Valcke, M. Gagne, M.H. Bourgault, C. Narame, S. Gadio, P. Poulin, P. Ayotte // Chemosphere. – 2022 – V. 289. – P. 133142. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2021.133142.
22. Rare Earth elements in human and animal health: State of art and research priorities / G. Pagano, F. Aliberti, M. Guida, R. Oral, A. Siciliano, M. Trifuoggi, F. Tommasi // Environ. Res. – 2015. – V. 142. – P. 215–220. DOI: 10.1016/j.envres.2015.06.039
23. О физической полноценности воды. URL: http://ecowater.ru/stat/page/polnozennosti_pityevoi_vodi.htm (дата обращения: 16.12.2021).
24. СанПиН 2.1.4.1116-02. Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды, расфасованной в емкости. URL: <https://ivo.garant.ru> (дата обращения: 12.02.2023).
25. Шварцев С.Л. Вода как главный фактор глобальной эволюции // Вестник Российской Академии наук. – 2013. – Т. 82. – № 2. – С. 124–131. DOI: 10.7868/S0869587313020199.
26. Хорн Р. Морская химия. – М.: Мир, 1972. – 400 с.
27. Когарко Л.Н. Новый геохимический критерий редкометалльного оруденения высокощелочных магм (Ловозерское месторождение, Кольский полуостров) // ДАН. – 2019. – Т. 487. – № 4. – С. 424–427.

Поступила: 29.03.2023 г.

Прошла рецензирование: 12.05.2023 г.

Информация об авторах

Мазухина С.И., доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник Института проблем промышленной экологии Севера – обособленного подразделения Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр Российской академии наук».

Дробобужская С.В., кандидат химических наук, старший научный сотрудник Института химии и технологии редких элементов и минерального сырья им. И.В. Тананаева – обособленного подразделения Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр Российской академии наук».

Сандимиров С.С., кандидат географических наук, ведущий научный сотрудник института проблем промышленной экологии Севера – обособленного подразделения Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр Российской академии наук».

Маслобоев В.А., доктор технических наук, главный научный сотрудник института проблем промышленной экологии Севера – обособленного подразделения Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр Российской академии наук».

UDC 536.7:556.5:54-4:628.16(470.21)

FEATURES OF CHANGES IN CHEMICAL COMPOSITION OF DRINKING WATER AS A RESULT OF WATER TREATMENT (LOVOZERO, KOLA PENINSULA)

Svetlana I. Mazukhina¹,
simazukhina@mail.ru

Svetlana V. Drogobuzhskaya²,
s.drogobuzhskaia@ksc.ru

Sergey S. Sandimirov¹,
sand1966@rambler.ru

Vladimir A. Masloboev¹,
v.masloboev@ksc.ru

¹ Institute of North Industrial Ecology Problems – Subdivision of the Federal Research Centre
«Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences»,
14a, Akademgorodok, Apatity, 184209, Russia

² Tananaev Institute of Chemistry – Subdivision of the Federal Research Centre
«Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences»,
26a, Akademgorodok, Apatity, 184209, Russia.

The relevance. Waste water and drinking water treatment is an important and relevant environmental problem faced by the industry. The analysis of scientific literature makes it possible to conclude that it is necessary to apply the methods of water purification and disposal or to develop a scheme for each specific water body, taking into account its physico-chemical characteristics and ionic composition. It is believed that the reagents introduced during water treatment do not change its chemical composition. However, lack of an extended chemical analysis casts doubt on water chemical composition immutability.

The main aim of this work is to assess changes in the chemical composition of drinking water supply in Lovozero village (Murmansk region) as a result of water treatment using physico-chemical modeling (PC «Selector»).

Objects of the research are samples of the waters of the Virma river and drinking waters of the central water supply (canteen, column) of Lovozero village, selected in November 2021.

Methods: inductively coupled plasma mass spectrometry (ELAN 9000 DRC-e, Perkin Elmer, USA), potentiometry (Expert-001, Russia) and titrimetry. Thermodynamic calculations were performed using the method of physico-chemical (thermodynamic) modeling implemented in the software package (PC «Selector»).

Results. With the help of monitoring and physico-chemical modeling (PC «Selector») of natural waters of the Virma river and the waters of the central water supply (Lovozero village, Murmansk region), the influence of reagents used as a result of water treatment on water chemistry is assessed. The paper shows the change in pH, Eh values, water chemical composition, newly formed phases composition, depending on the amount of reagents (coagulant, liquid chlorine, soda and sodium hypochlorite (NaOCl)). The formation of cations and anions of rare-earth elements at different concentrations of liquid chlorine indicates the possibility of creating a selective method of water purification from rare-earth elements on sorbents of different types or using these properties in ore enrichment. The replacement of reagents with NaOCl solid salt simplifies water treatment, but does not bring water chemical composition closer to that of bottled water and does not make it more useful for macro components.

Key words:

Thermodynamic modeling, natural and drinking water, reagents, water treatment, REE, uranium.

The research was carried out in R&D subjects no. 1021051803677-1, FMEZ-2022-0010, FMEZ-2022-0018.

REFERENCES

1. Svetlov A.V., Minenko V.G., Samusev A.L. Purification of mine water using electrochemical coagulation technology at Kola MMC's Severny Mine. *Non-Ferrous Metals*, 2019, no. 11, pp. 52–56. In Rus.
2. Ding S., Deng Y., Bond T., Fang C., Cao Z., Chu W. Disinfection byproduct formation during drinking water treatment and distribution: a review of unintended effects of engineering agents and materials. *Water Research*, 2019, no. 160, pp. 313e329. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.05.024> (accessed 15 February 2023).
3. Dvoichenkova G.P., Minenko V.G., Pismenny A.V., Zyryanov I.V., Ostrovskaya G.Kh. Environmentally safe method of processing and disposal of mineralized circulating tailings water at the concentration plants operated by ALROSA. *Mining Journal*, 2011, no. 1, pp. 97–100. In Rus.
4. Zahedi R., Mirmohammadi S.J. Sulfate removal from chemical industries' wastewater using ettringite precipitation process with recovery of $Al(OH)_3$. *Applied Water Science*, 2022, no. 12, pp. 226. Available at: <https://doi.org/10.1007/s13201-022-01748-7> (accessed 15 February 2023).
5. Zaoztrovtssev V.N., Minaeva I.A., Sukhanevich M.M., Gorev A.V. Treatment process for mining wastewater. *Mining Journal*, 2014, no. 3, pp. 68–73. In Rus.
6. GOST R 56237-2014 (ISO 5667-5:2006). *Voda pitevaya. Otbort prob na stantsiyakh vodopodgotovki i v truboprovodnykh raspredelitelnykh sistemakh* [State Standard 56237-2014. Drinking water. Sampling on water treatment stations and in piped distribution systems]. Moscow, StandardInform Publ., 2014. 23 p.
7. Skhema vodosnabzheniya i vodootvedeniya selskogo poseleniya Lovozero Lovozerskogo rayona Murmanskoy oblasti na 2014–2018 gg. i na period do 2028 g. [Water supply and sewerage

- system in the Lovozero, Lovozero District, Murmansk Region, for 2014–2018 and for the Period up to 2028]. Lovozero, Energo Consult LLC Publ., 2014. 186 p.
8. Mazukhina S.I. *Formirovaniye poverkhnostnykh i podzemnykh vod Khibinskogo gornogo massiva* [Formation of surface and underground water of the Khibiny Mountain Range]. Apatity, KSC RAS Publ. House, 2012. 173 p.
 9. Mazukhina S.I., Maksimova V.V., Chudnenko K.V., Masloboev V.A., Sandimirov S.S., Drogobuzhskaya S.V., Tereshchenko P.C., Pozhilenko V.I., Gudkov A.V. *Kachestvo vod Arkticheskoy zony Rossiyskoy Federatsii: fiziko-khimicheskoe modelirovaniye formirovaniya vod, formy migratsii elementov, vliyaniye na organizm cheloveka* [Water quality in the Arctic zone of the Russian Federation: physical and chemical modeling of water. Formation, forms of element migration, impact on the human body]. Apatity, KSC RAS Publ. House, 2020. 158 p.
 10. Chudnenko K.V. *Termodinamicheskoe modelirovaniye v geokhimi: teoriya, algoritmy, programnoye obespecheniye, prilozheniya* [Thermodynamic modeling in geochemistry: theory, algorithms, software, applications]. Novosibirsk, Geo Publ., 2010. 287 p.
 11. Mazukhina S., Krasavtseva E., Makarov D., Maksimova V. Thermodynamic modeling of hypogene processes in loparite ore concentration tailings. *Minerals*, 2021, vol. 11, no. 9, pp. 996. Available at: <https://doi.org/10.3390/min11090996> (accessed 15 February 2023).
 12. Sandimirov S.S., Pozhilenko V.I., Mazukhina S.I. Drogobuzhskaya S.V. Shirokaya A.A. Tereshchenko P.S. Chemical composition of natural waters of the Lovozero massif, Russia. *Model. Earth Syst. Environ.*, 2022, no. 8, pp. 4307–4315. Available at: <https://doi.org/10.1007/s40808-022-01362-1> (accessed 15 February 2023).
 13. *O vode. Kak pravilno ispol'zovat' koagulyanty dlya ochistki vody?* [About water. How to properly use coagulants for water purification?] Available at: <https://o-vode.net/ochistka/koagulyanty> (accessed: 30 august 2022).
 14. Linnik P.N., Zhezherya V.A. *Alyuminiy v poverkhnostnykh vodakh Ukrainy: sodержaniye, formy migratsii, osobennosti raspredeleniya sredi abioticheskikh komponentov* [Aluminum in surface water in Ukraine: content, forms of migration, distribution of abiotic components]. *Water Resour.*, 2013, no. 40, pp. 157–169.
 15. Wickström T., Clarke N., Derome K., Derome J., Røgeberg E. Comparison study of five analytical methods for the fractionation and subsequent determination of aluminium in natural water samples. *J. Environ. Monit.*, 2000, no. 2, pp. 171–181. Available at: <https://doi.org/10.1039/a909139d> (accessed 15 February 2023).
 16. Xing Y., Etschmann B., Liu W., Mei Y., Shvarov Y., Testemale D., Tomkins A., Brugger J. The role of fluorine in hydrothermal mobilization and transportation of Fe, U and REE and the formation of IOCG deposits. *Chemical Geology*, 2019, no. 504, pp. 158–176.
 17. Migdisov A., Williams-Jones A.E., Brugger J., Caporuscio F.A. Hydrothermal transport, deposition, and fractionation of the REE: experimental data and thermodynamic calculations. *Chemical Geology*, 2016, no. 439, pp. 13–42. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemgeo.2016.06.005> (accessed 15 February 2023).
 18. Pagano G., Guida M., Tommasi F., Oral R. Health effects and toxicity mechanisms of rare Earth elements - knowledge gaps and research prospects. *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, 2015, no. 115, pp. 40–48. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2015.01.030
 19. Liang Q., Yin H., Li J., Zhang L., Hou R., Wang S. Investigation of rare Earth elements in urine and drinking water of children in mining area. *Medicine*, 2018, e12717. DOI: 10.1097/MD.00000000000012717
 20. Liu Y., Wu M., Zhang L., Bi J., Song L., Wang L., Liu B., Zhou A., Cao Z., Xiong C., Yang S., Xu Sh., Xia W., Li Y., Wang Y. Prenatal exposure of rare Earth elements cerium and ytterbium and neonatal thyroid stimulating hormone levels: findings from a birth cohort study. *Environ. Int.*, 2019, no. 133, p. 105222. DOI: 10.1016/j.envint.2019.105222
 21. Cirtiu C.M., Valcke M., Gagne M., Bourgault M.H., Naramé C., Gadio S., Poulin P., Ayotte P. Biological monitoring of exposure to rare Earth elements and selected metals in the Inuit population of Nunavik, Canada. *Chemosphere*, 2022, no. 289, p. 133142. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2021.133142.
 22. Pagano G., Aliberti F., Guida M., Oral R., Siciliano A., Trifuoggi M., Tommasi F. Rare Earth elements in human and animal health: State of art and research priorities. *Environ. Res.*, 2015, no. 142, pp. 215–220. DOI: 10.1016/j.envres.2015.06.039
 23. *fizicheskoy polnotsennosti vody* [About the physical usefulness of water]. URL: http://ecowater.su/stat/page/polnozennosti_pityevoi_vodi.htm (accessed: 16 December 2021).
 24. SanPiN 2.1.4.1116-02. *Pitevaya voda. Gigienicheskie trebovaniya k kachestvu vody, rasfasovannoy v emkosti* [Potable water. Public health requirements for the quality of water packaged in containers. Quality control]. Available at: <https://ivo.garant.ru> (accessed: 12 February 2023).
 25. Shvartsev S.L. Voda kak glavnyy faktor globalnoy evolyutsii [Water as the main factor of global evolution]. *Her. Russ. Acad. Sci.*, 2013, vol. 83, pp. 78–85.
 26. Khom R. *Morskaya khimiya* [Marine chemistry]. Moscow, Mir Publ., 1972. 400 p.
 27. Kogarko L.N. A new geochemical criterion for rare-metal mineralization of high-alkalic magmas (Lovozero deposit, Kola Peninsula). *Doklady Earth Sciences*, 2019, vol. 487, no. 2, pp. 922–924.

Received: 29 March 2023.

Reviewed: 12 May 2023.

Information about the authors

Svetlana I. Mazukhina, Dr. Sc., leading researcher, Institute of North Industrial Ecology Problems.

Svetlana V. Drogobuzhskaya, Cand. Sc., associate professor, senior researcher, Tananaev Institute of Chemistry.

Sergey S. Sandimirov, Cand. Sc., senior researcher, Institute of North Industrial Ecology Problems.

Vladimir A. Masloboev, Dr. Sc., professor, chief scientific officer, Institute of North Industrial Ecology Problems.

Компьютерная верстка *О.Ю. Аршинова*
Корректура и перевод на английский язык *С.В. Жаркова*
Дизайн обложки *Т.В. Буланова*

Фотографии на обложке взяты из личного архива
Валерия Касаткина

Руководство для авторов и образец оформления статьи: izvestiya.tpu.ru

Подписано к печати 27.10.2023. Дата выхода журнала: 31.10.2023.
Формат 60x84/8. Бумага «Снегурочка».
Печать XEROX. Усл. печ. л. 29,43. Уч.-изд. л. 26,62.
Заказ 245-23. Тираж 500 экз. Цена свободная.



Издательство

ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Адрес учредителя, редакции, издателя, типографии:
634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, каб. 139.