

**ИЗВЕСТИЯ
ТОМСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
ИНЖИНИРИНГ ГЕОРЕСУРСОВ**

Том 333, № 5, 2022

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Семилетов И.П., гл. редактор, д-р геогр. наук (Россия)
Оствальд 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)
Конторович 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)
Чогегуров 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)
Кирьянова Л.Г., канд. филос. наук (Россия)
Глазырин А.С., выпуск. редактор, д-р техн. наук (Россия)
Строкова Л.А., д-р геол.-минерал. наук (Россия)
Мазуров А.К., д-р геол.-минерал. наук (Россия)
Боярко Г.Ю., д-р экон. наук, канд. геол.-минерал. наук (Россия)
Стрижак П.А., д-р физ.-мат. 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, 2022

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 геологических объектов.

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

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

Volume 333, № 5, 2022

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)
Belozherov 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)
Glazyrin A.S., managing editor, Dr. Sc. (Russia)
Ludmila A. Strokova, Dr. Sc. (Russia)
Alexey K. Mazurov, Dr. Sc. (Russia)
Boyarko G.Yu., Dr. Sc., Cand. Sc. (Russia)
Strizhak P.A., 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 Communications).

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.

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENTS

- Минералого-геохимическая характеристика и условия формирования Базилевского медного рудопоявления (Южное Предуралье)**
Рахимов И.Р., Мичурин С.В., Султанова А.Г., Киселёва Д.В., Карамова А.М.
- Исследование качества вскрытия продуктивных пластов месторождений Западной Сибири различными типами биополимерных буровых растворов**
Захаров А.С., Минаев К.М., Пестерев А.В., Боев А.С.
- Разработка рекомендаций по оптимизации конструкции снаряда для шароструйного бурения**
Исаев Е.Д., Ковалев А.В., Саруев Л.А.
- Расчет параметров схемы газопаровой установки с глубокой утилизацией и отпуском теплоты**
Галашов Н.Н., Туболев А.А., Беспалов В.В., Минор А.А., Болдушевский Е.С.
- Растворенные формы миграции гумусовых кислот в поверхностных водных объектах Ямало-Ненецкого автономного округа**
Лепокурова О.Е., Иванова И.С., Трифонов Н.С., Колубаева Ю.В., Соколов Д.А.
- Минералого-геохимические особенности верхнемеловых морских железняков Аятской свиты (Тургайский прогиб)**
Максимов П.Н., Рудмин М.А.
- Геофизический и тепловой анализ грунтов в зонах размещения канализационных коллекторов г. Санкт-Петербурга**
Полонников В.Ю., Вольнин А.Ф.
- Литолого-минералогическое обоснование стратификации Нижнеберёзовской подсвиты Медвежьего и Вынгапуровского месторождений**
Ананьева Л.Г., Дорошенко А.А., Дорошенко А.А., Изосимов Д.И., Карымова Я.О., Качинская И.В., Коровкин М.В., Нерсесов С.В., Постникова О.В.
- Определение ¹⁵¹Sm в пробах почвы с использованием метода жидкостной сцинтилляционной спектрометрии**
Сальменбаев С.Е., Берикхан К.А., Мухамедияров Н.Ж., Жамалдинов Ф.Ф., Харченко А.А., Мустафина К.Т.
- Расчёт распределения температуры в пласте на стадии инициации процесса парогравитационного дренажа**
Гильманов А.Я., Шевелёв А.П.
- Разработка алмазного бурового долота для направленного бурения**
Нескоромных В.В., Петенёв П.Г., Лысаков Д.В., Попова М.С., Головченко А.Е., Баочанг Л.
- Использование многомерных статистических моделей при оперативном контроле извлекаемых запасов Визейских залежей Пермского края**
Галкин С.В., Лобанов Д.С.
- Самоочищение продуктивного горизонта на месте проведения двухскважинного опыта по выщелачиванию урана на Добровольном месторождении (Курганская область)**
Сащенко А.В., Авдонин Г.И., Тарханова Г.А., Носков М.Д.
- Стабильные изотопы как инструмент контроля границ закрытых экосистем на примере бассейна р. Витим**
Пыряев А.Н., Новиков Д.А., Максимова А.А.
- Геоэлектрические признаки рекультивированных отработанных россыпных месторождений золота**
Осипова П.С., Оленченко В.В., Калганов А.С., Чекрыжов А.В.
- 7 Mineralogy, geochemistry and formation of the Bazilevo copper occurrence (Southern Pre-Urals)**
Rakhimov I.R., Michurin S.V., Sultanova A.G., Kiseleva D.V., Karamova A.M.
- 23 Influence of the composition of biopolymer drilling fluids on the quality of exposure of productive layers of the Western Siberia**
Zakharov A.S., Minaev K.M., Pesterev A.V., Boev A.S.
- 32 Developing recommendations for optimizing the design of the drilling bit for pellet impact drilling**
Isaev E.D., Kovalev A.V., Saruev L.A.
- 43 Calculation of the parameters of the scheme of a gas-steam plant with deep utilization and heat release**
Galashov N.N., Tubolev A.A., Bepalov V.V., Minor A.A., Boldushevsky E.S.
- 56 Dissolved forms of migration of humic substances in surface water bodies of the Yamal-Nenets Autonomous District**
Lepokurova O.E., Ivanova I.S., Trifonov N.S., Kolubaeva Yu.V., Sokolov D.A.
- 70 Mineralogical and geochemical features of upper cretaceous marine ironstones of the Ayat Formation (Turgay depression)**
Maximov P.N., Rudmin M.A.
- 81 Geophysical and thermal analysis of soils in the zones of location of sewer collectors in St. Petersburg**
Polovnikov V.Yu., Volynin A.F.
- 89 Lithological and mineralogical substantiation of the Lower Berezovskaya subformation stratification of the Medvezhje and Vyngapurovskoe deposits**
Ananyeva L.G., Doroshenko A.A., Doroshenko A.A.I., Izosimov D.I., Karymova Ya.O., Kachinskas I.V., Korovkin M.V., Nersesov S.V., Postnikova O.V.
- 100 Determination of ¹⁵¹Sm in soil samples by using liquid scintillation counting method**
Salmenbaev S.E., Berikhan K.A., Mukhamediyarov N.Zh., Zhamaldinov F.F., Kharchenko A.A., Mustafina K.T.
- 108 Calculation of temperature distribution in a reservoir at the initiation stage of steam-assisted gravity drainage**
Gilmanov A.Ya., Shevelev A.P.
- 116 Development of diamond drilling bit for directional drilling**
Neskoromnykh V.V., Petenev P.G., Lysakov D.V., Popova M.S., Golovchenko A.E., Baochang L.
- 126 Use of multidimensional statistical models for operational control of recoverable reserves for the Visean deposits of the Perm region**
Galkin S.V., Lobanov D.S.
- 137 Self-purification of the productive horizon at the site of the two-hole in situ leaching experiment at the Dobrovolnoe uranium deposit (Kurgan region)**
Sashchenko A.V., Avdonin G.I., Tarkhanova G.A., Noskov M.D.
- 148 Stable isotopes as a tool to check the boundaries of closed ecosystems, by the example of the Vitim river basin**
Pyrayev A.N., Novikov D.A., Maksimova A.A.
- 158 Geoelectric attributes of reclaimed post-mining placer gold deposit**
Osipova P.S., Olenchenko V.V., Kalganov A.S., Chekryzhov A.V.

- | | | |
|--|------------|--|
| Повышение эффективности механизма очистки газов от аэрозолей масла фильтрами из металлокерамических материалов
Хабибуллин М.Я. | 168 | Increasing the efficiency of the mechanism for gas cleaning from oil aerosols by filters from metaloceramic materials
Khabibullin M.Ya. |
| Анализ применения технологии водогазового воздействия на пласты с наличием газовой шапки с целью увеличения нефтеотдачи и утилизации низконапорного попутного газа на примере месторождений Западной Сибири
Зятиков П.Н., Мазитов Р.Ф., Волков П.В., Захарова Н.П. | 178 | Analysis of the application of the technology of water and gas impact on the formations with the presence of a gas cap for increasing oil recovery and utilization of low-pressure associated gas on the example of the fields of Western Siberia
Zyatikov P.N., Mazitov R.F., Volkov P.V., Zakharova N.P. |
| Граничные технико-экономические показатели применимости фронтальных погрузчиков при работе в качестве выемочно-транспортных машин
Журавлев А.Г., Черных В.В. | 186 | Boundary technical and economic indicators of the applicability for front loaders working as excavation and transportation machines
Zhuravlev A.G., Chernykh V.V. |
| Метод диагностики обрывов стержней ротора в асинхронных электродвигателях на основе регрессионного анализа модуля результирующего вектора тока статора
Баннов Д.М. | 196 | Method of diagnosing broken rotor bars of induction motors based on regression analysis of the stator current resultant vector module
Bannov D.M. |
| Гидрогеологические условия разработки и гидрогеохимия дренажных вод гранитного карьера Борок
Сухорукова А.Ф. | 209 | Hydrogeological conditions of development and hydrogeochemistry of drainage water of the Borok granite quarry
Sukhorukova A.F. |

УДК 553.06, 553.2

МИНЕРАЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА И УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ БАЗИЛЕВСКОГО МЕДНОГО РУДОПРОЯВЛЕНИЯ (ЮЖНОЕ ПРЕДУРАЛЬЕ)

Рахимов Ильдар Рашитович¹,
rigel92@mail.ru

Мичурин Сергей Васильевич¹,
s_michurin@mail.ru

Султанова Анна Геннадиевна¹,
anna_zakharova.ig@mail.ru

Киселёва Дарья Владимировна²,
kiseleva@igg.uran.ru

Карамова Алсу Мусаевна¹,
alsu.2013@bk.ru

¹ Институт геологии УФИЦ РАН,
Россия, 450077, г. Уфа, ул. К. Маркса, 16/2.

² Институт геологии и геохимии им. А.Н. Заварицкого Уральского Отделения РАН,
Россия, 620016, г. Екатеринбург, ул. Ак. Вонсовского, 15.

Актуальность исследования обусловлена обнаружением новых рудопроявлений меди и необходимостью выяснения условий их формирования в пермских отложениях Южного Предуралья на фоне слабой литологической и минералого-геохимической изученности последних. Генезис медистых песчаников Предуральского пояса всё ещё является предметом дискуссий. Возникновение Си-минерализации связывают как с син-, так и с эпигенетическими процессами, для последних предполагают инфильтрационный либо эксфильтрационный механизм миграции Си-растворов.

Цель: минералого-геохимическое исследование руд Базилевского медного рудопроявления и выяснение условий его формирования.

Методы исследования включают полевые геологические работы, оптическую и электронную микроскопию с рентгеноспектральным микроанализом, рентгеновскую дифрактометрию, рентгенофлуоресцентный, масс-спектрометрический и атомно-эмиссионный анализы с индуктивно связанной плазмой.

Результаты. Выполнена минералого-геохимическая характеристика руд Базилевского медного проявления Южного Предуралья, изучены условия образования вмещающих пород и рудных тел. Установлена их приуроченность к древесным фоссилиям с наследованием общей морфологии. Руды (0,2...18,8 мас. % Си, Ag до 150 г/т, Pb до 270 г/т) локализованы в сероцветных песчаных отложениях казанского яруса, представляющих собой аллювиальные отложения. Площадь рудопроявления составляет ≥ 1200 м², выявлено два рудоносных горизонта в разрезе. По внутреннему строению выделено три типа рудных тел. Главными рудными минералами являются гидрокарбонаты (азурит, малахит) и сульфиды Си (халькозин, борнит, халькопирит и др.). В целом минералого-геохимические особенности руд согласуются с полигенной гидротермально-осадочной моделью их образования при участии биогенных процессов. Источником рудных элементов служили нижележащие терригенные породы (в особенности красноцветные), а восходящая миграция минералообразующих растворов произошла по разрывным нарушениям.

Ключевые слова:

Южное Предуралье, казанский ярус, медистые песчаники, минерализованные деревья, минералогия, геохимия.

Введение

Формация медистых песчаников широко распространена в Предуралье, образуя 1500-км меденосный пояс от Пермского края на севере до Оренбургской области на юге. Оруденение приурочено к отложениям уфимского, казанского и уржумского ярусов пермской системы [1, 2]. На протяжении более 200 лет медистые песчаники Предуралья являлись одним из главных источников меди в Европе. В настоящее время в России медистые песчаники утратили своё значение, хотя в мире около 1/3 мировых запасов и добычи меди приходится именно на данный тип оруденения. Кроме Си, медистые песчаники являются концентраторами таких металлов, как Ag, Co, Zn, V, элементы платиновой группы и др. [2, 3].

В Южном Предуралье проявления медистых песчаников распространены в Башкортостане и Оренбург-

ской области, а наиболее богатой по суммарным запасам меди является Каргалинская группа месторождений, где небольшие по размерам рудные тела часто приурочены к растительным и животным остаткам [4, 5]. На территории Башкирии многочисленные мелкие месторождения и рудопроявления медистых песчаников (известно около 770 рудников) развиты в юго-западной части, общие запасы меди в них оцениваются в 176 тыс. т [6]. Рудники Башкирии и Оренбуржья разрабатывались в XVII – начале XX вв., а руды переплавлялись на Воскресенском медеплавильном заводе Уфимской губернии. В настоящее время изучение медистых песчаников в Башкирии практически не ведётся. Между тем результаты геолого-съёмочных работ и результаты шлихового опробования дают основание предполагать, что известные на сегодняшний день рудники – лишь часть того, что реально находится в

пермских отложениях. К примеру, разработки песчано-гравийных карьеров до сих пор приводят к открытию медных рудопоявлений. К таковым относятся Алыштанское, Новомихайловское, Базилевское рудопоявления, вскрытые при разработке песчано-гравийных месторождений в Фёдоровском районе республики Башкортостан. Базилевское и Новомихайловское рудопоявления находятся вблизи Дедовской группы рудников, отработывавшихся до 1910-х гг. [7]. Кроме того, в этом районе в песчаниках казанского яруса недавно была обнаружена Сабантуйская хромитовая палеороссыпь, в рудах которой концентрация Cr_2O_3 достигает 15–17 мас. % [8]. В связи с этим отложения казанского яруса в Южном Предуралья могут иметь ещё более важное научное и практическое значение.

Проблема генезиса медных руд в осадочных формациях актуальна до сих пор. Существуют различные взгляды для объяснения происхождения пермских медистых песчаников Предуралья, которые можно обобщить в три теории – биогенную, гидротермально-метасоматическую и осадочную [9]. До последнего времени наиболее популярной являлась гидрогенно-осадочная теория [10]. В настоящее время всё большее количество исследователей придерживаются полигенной модели образования стратиформных месторождений меди и отмечают множественность источников рудных элементов [11–13]. Основой для изучения происхождения медистых песчаников являются геохимические исследования [2, 14, 15]. Однако геохимическое изучение Предуральских медепоявлений проводилось более 40 лет назад ныне устаревшими методами, которыми многие элементы не определялись. В настоящей статье приведены результаты литологических и минералого-геохимических исследований пород и руд Базилевского медного рудопоявления, недавно обнаруженного авторами в сероцветных гравийно-песчаных отложениях казанского яруса, вскрытых карьером по добыче песчано-гравийного материала. Обсуждается его генезис и перспективы оруденения.

Геологическая позиция объекта исследования

Изучаемая территория в структурно-тектоническом отношении приурочена к Южно-Татарскому своду Восточно-Европейской платформы, а в геоморфологическом плане она отвечает южному отрогу Бугульминско-Белебеевской возвышенности (Фёдоровско-Стерлибашевский вал) [16]. По берегам ручьёв и оврагов на возвышенности обнажаются сероцветные (нижний подъярус) и красноцветные (верхний подъярус) карбонатно-терригенные преимущественно песчаные отложения казанского яруса. Их мощность в рассматриваемом районе достигает 50–100 м [17]. Залегание пород в основном субгоризонтальное. Стоит отметить, что эти отложения в стратиграфическом, литологическом и геохимическом отношении изучены слабо, в настоящее время они (достаточно условно) отнесены к белебеевской свите ($P_2kz\ bl$) [8].

Многочисленные медные рудопоявления Западной Башкирии (рис. 1, а) объединены в три группы месторождений: Сараево-Рудничную, Миякинско-

Стерлибашевскую и Фёдоровско-Кузьминовскую [6]. Рудовмещающими являются и сероцветные (преимущественно прибрежно-морские), и красноцветные (лагунно-континентальные) отложения. Базилевское проявление может быть отнесено к Фёдоровско-Кузьминовской группе, которая образует плотное скопление месторождений и проявлений по берегам р. Ашкадар (рис. 1, а). Наиболее известным среди них является Дедовское месторождение, площадь которого составляет ~200 тыс. м² [7].

Методы исследования

Геологическое описание разреза с отбором проб (25 шт.) было проведено в 2020–2021 гг. Образцы вмещающих пород и руд изучались в полированных шлифах и аншлифах на оптическом микроскопе Carl Zeiss Axioskop 40 (ИГ УФИЦ РАН, Уфа) и растровом электронном микроскопе JEOL JSM-6390LV (ЦКП «Геоаналитик» ИГГ УрО РАН, Екатеринбург, аналитик Н.С. Чебыкин). Состав обломочной фракции песчаников определялся рутинным петрографическим методом на основе подсчёта 300–700 зёрен в шлифах. Химический анализ минералов получен на ЭДС-приставке INCA Energy 450 X-Max 80 Oxford Instruments при ускоряющем напряжении 20 кВ, время регистрации импульсов 30 с.

Химический состав образцов определялся при помощи рентгенофлуоресцентного анализа (Carl Zeiss VRA-30, ИГ УФИЦ РАН, Уфа, аналитики Р.Р. Ахмедова, С.В. Мичурин) и атомно-эмиссионного анализа (Shimadzu ICPE-9000, АО «ИНХП», Уфа, аналитики А.М. Карамова, З.Р. Биктимерова). Валовый микроэлементный состав получен масс-спектрометрическим анализом с индуктивно связанной плазмой после микроволнового растворения в смеси кислот $\text{HCl}+\text{HNO}_3+\text{HF}$ в блоке чистых помещений классов 6 и 7 ИСО (Perkin Elmer NexION 300S, ЦКП «Геоаналитик» ИГГ УрО РАН, аналитики Д.В. Киселёва, Н.В. Чередниченко). Для контроля правильности и точности определения микроэлементного состава использованы сертифицированные образцы базальта BCR-2 и андезита AGV-2 (USGS). Содержания рудных элементов (Cu, Ag, Pb, Zn, Co, Ni, Cr) в ряде проб дополнительно проверялись атомно-абсорбционным анализом (Спектр-5, ИГ УФИЦ РАН, Уфа, аналитик Н.Г. Христофорова).

Рентгенофазовый анализ проводился на дифрактометре ДРОН-4 (ИГ УФИЦ РАН, аналитик Г.С. Ситдикова). Съёмка выполнялась в $\text{Cu K}\alpha$ излучении с шагом $0,02^\circ$ и временем счёта, равным 10 с. Для расчётов использовалась длина волны $\text{K}\alpha_1=1,54060 \text{ \AA}$, полученная при напряжении и токе на рентгеновской трубке 40 кВ и 40 мА. Определение минералов проводилось по набору их межплоскостных расстояний и относительным интенсивностям соответствующих линий на дифрактограмме, ориентируясь на отражения минералов из открытой базы данных МИНКРИСТ Института экспериментальной минералогии РАН (Черноголовка).

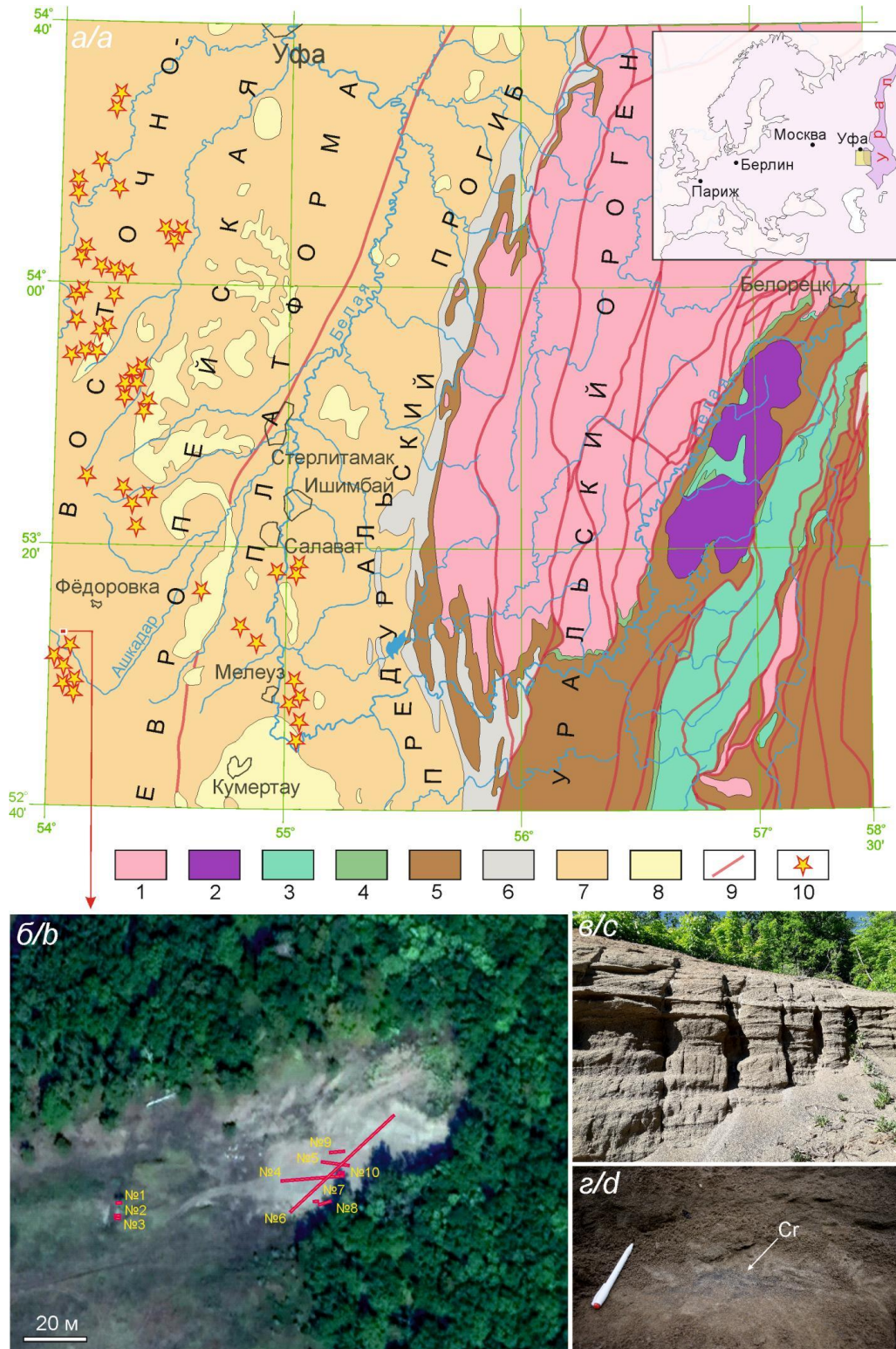


Рис. 1. Положение Базилевского медного проявления: а) фрагмент геологической карты по [18] с упрощениями; б) спутниковый снимок Google Базилевского карьера; в) субвертикальные трещины в косослоистых песчаниках стенки карьера; г) прослой хромитового песчаника. Легенда: 1 – рифейско-вендские осадочно-метаморфические комплексы; 2 – оphiолитовые массивы; 3–6 – вулканогенно-осадочные комплексы различного возраста: 3 – ордовикского, 4 – силурийского, 5 – девонского, 6 – каменноугольного; 7 – пермские осадочные отложения; 8 – мезо-кайнозойские отложения; 9 – разломы; 10 – медные рудники по [6]

Fig. 1. Position of the Bazilevo copper occurrence: a) offset of geological map after [18] with simplifications; b) Google satellite image of the Bazilevo quarry; c) subvertical faults in cross-bedded sandstones of quarry wall; d) chromite layers. Legend: 1 – Riphean-Vendian metamorphic and sedimentary complexes, 2 – ophiolites, 3–6 – different age volcanogenic-sedimentary complexes: 3 – Ordovician, 4 – Silurian, 5 – Devonian, 6 – Carboniferous complexes; 7 – Permian sedimentary complexes, 8 – Mesozoic-Cenozoic sediments, 9 – faults, 10 – copper mines according to [6]

Результаты исследования

Геолого-литологическая характеристика отложений

Мощность вскрытой части разреза в Базилевском карьере достигает 8,5 м. Разрез выполнен линзовидно-косослоистыми сероцветными песчаниками и слабо литифицированными гравелитами и конгломератами. В обнажении диагностирован плоскопараллельный тип косой слоистости с субширотным направлением наложения, мощность слоёв варьирует от 10–15 до 50–60 см. Они имеют преимущественно вогнутую форму, в средней части разреза – S-образную. Углы падения слоёв в косых сериях меняются от 9° до 35°, более крутые углы наблюдаются в более грубообломочных отложениях. Толщина отдельных слоёв варьирует в диапазоне 1–5 см. Вид соотношения косослоистых серий параллельный вогнуто-выпуклый. Серии прерываются прослоями субгоризонтальнослоистых песчаников мощностью 3–5 см, залегающих на размытой поверхности косых серий, реже – на серийном шве. Породы разбиты на отдельные блоки субвертикальными трещинами (рис. 1, в), простирание которых находится в пределах 156°–162°. Они имеют ширину до 10 см и заполнены рыхлым карбонатно-песчаным материалом. В верхней части разреза, в 40–50 см ниже почвенно-растительного слоя, обнаружены тонкие (1–2 мм), но выдержанные прослои хромитового песчаника (рис. 1, г, обр. В₂₀₋₁₄). Также 2-мм хромитсодержащий прослой был обнаружен в грубозернистом песчанике, вмещающем рудное тело № 4 (обр. В₂₀₋₄).

Песчаные гравелиты и конгломераты занимают подчинённое положение в разрезе, образуя редкие прослои мощностью от 5–10 до 40 см и выполнены в основном обломками красноватых и зеленоватых кремней размером 2–20 мм. В верхней части разреза песчаники имеют карбонатный и глинисто-карбонатный цемент контактового типа, образцы непрочные и достаточно легко крошатся. В самой нижней части разреза, где залегают рудные тела, состав цемента песчаников меняется на глинисто-кремнистый, кремнистый и глинисто-железистый (гётитовый) контактивно-порового типа с реликтовым карбонатным цементом, образцы здесь механически более прочные. Обломки в песчаниках имеют размеры 0,1–0,6 мм, преобладает размерность 0,2–0,3 мм, сортировка варьирует от средней до хорошей. Отмечается общее погрубление обломочного материала сверху вниз по разрезу. Обломки имеют разную окатанность, в зависимости от их состава – от 0 до 4 по шкале Л.Б. Рухина. В составе обломков преобладают метаморфические породы – кварциты и кристаллические сланцы (суммарно более 50–60 %). В песчаниках непосредственно вмещающих рудные тела, доля обломков пород варьирует от 61 до 85 %, из которых обломки магматических пород – 0,4...1,7 %, осадочных пород – 1,2...11,7 %, метаморфических пород – 88–99 % (из них кварциты – 24–53 %, сланцы – 40–62 %, остальные метаморфиты – 7–21 %). Доля обломков кварца варьирует в пределах 10–17 %, руд-

ных минералов – 0,3...10,4 % (среди них преобладают хромшпинелиды), силикатных минералов 2,2...11,9 % (полевошпат, амфибол, хлорит, пироксен). На известных дискриминационных диаграммах В.Д. Шутова [19] изучаемые песчаники распределяются между лититовыми и кремнистыми граувакками.

Геохимия песчаных отложений

Песчаники, вмещающие рудные тела Базилевского проявления, характеризуются повышенным содержанием Cu (от 200 до 2000 г/т) в сравнении с типичными песчаниками казанского яруса в регионе (20–200 г/т) [17]. Концентрация Fe в граувакках умеренно низкая (FeO_t 2,8...6,5 мас. %), а содержания Ca меняются от низких до умеренно высоких (CaO 5,7...13,3 мас. %). При этом между содержаниями Cu, Fe и Ca выявлена положительная корреляция, отчётливая в паре Cu–Fe ($R^2=0,63$), и менее явная в паре Cu–Ca ($R^2=0,24$). Наиболее высокие количества CaO отмечаются в пробе из верхнего пласта песчаника, максимально удалённого от рудного горизонта, и в известково-песчаном материале, заполняющем 10-см трещину в разрезе (табл. 1). В песчаниках определены умеренные вариации содержаний Si, Al, Na, K и S (коэффициент вариации 13–22 %) при значимых вариациях концентраций Ti, Fe, Ca, Mg (коэффициент вариации 33–46 %). Это может быть связано с более равномерным распределением в песчаниках силикатов и алюмосиликатов (кварца, полевых шпатов) по сравнению с Fe–Mg силикатами и рудными минералами. Основное количество Ca находится в карбонатном цементе, вариации содержаний этого элемента зависят от распределения цементирующего материала. Большинство микроэлементов характеризуются слабыми количественными вариациями, исключением служат Cr, V, Co, Ni, имеющие резко повышенные концентрации в пробе хромитосодержащего песчаника (проба В₂₀₋₁₄, табл. 1). Величина Sr/Ba в большинстве проб <1, но в двух пробах с повышенным содержанием Ca отношение Sr/Ba=1 и 1,4.

Морфология рудных тел

В Базилевском рудопроявлении мы выявили десять рудных тел (рис. 1, б), имеющих сходную морфологию – значительную длину и округлую форму в поперечном сечении (рис. 2). Параметры рудных тел представлены в табл. 2. Все они однозначно приурочены к древесным фоссилиям и представляют собой минерализованные стволы деревьев, вскрытые на дне карьера. Рудные тела занимают в разрезе определённый горизонт мощностью ~1 м, а площадь их развития не менее 1200 м². Для установления реальных размеров зоны оруденения и отдельных рудных тел требуются дополнительные горные работы. Большинство рудных тел имеют близкое простирание – 85–96° (верхний горизонт). Рудное тело № 6 залегает под рудными телами №№ 4, 5 и 7, «пересекая» их направления – нижний горизонт. Рудные тела залегают под небольшим углом – до 5–7°.

Таблица 1. Химический состав песчаных пород и руд Базилевского медного рудопоявления
Table 1. Chemical composition of sandstones and ores of the Bazilevo ore occurrence

№/no.	1	2	3	4*	5	6*	7	8	9	10	11	12*	13*	14*
Элемент/Element	B ₂₀₋₁	B ₂₀₋₂	B ₂₀₋₃	B ₂₀₋₄	B ₂₀₋₅	B ₂₀₋₆	B ₂₀₋₈	B ₂₀₋₉	B ₂₀₋₁₀	B ₂₀₋₁₄	B ₂₀₋₁₅	B ₂₀₋₁₆	B ₂₀₋₁₇	B ₂₁₋₁
SiO ₂	69,40	58,40	9,06	55,90	69,93	38,70	67,82	56,60	59,40	47,20	65,90	68,73	60,50	56,50
TiO ₂	0,24	0,32	0,07	0,74	0,56	0,39	0,53	0,70	0,45	0,89	0,54	0,35	0,73	0,46
Al ₂ O ₃	3,85	2,36	0,21	8,49	7,47	4,75	8,30	6,98	4,47	8,09	8,33	5,30	9,38	6,19
FeO _i	2,50	7,56	30,70	5,59	4,40	5,60	3,81	6,20	4,90	6,49	4,64	2,81	5,56	3,48
MnO	0,23	0,03	0,02	0,24	0,03	0,04	0,08	0,07	0,05	0,16	0,09	0,13	0,15	0,09
CaO	10,11	6,73	3,02	9,12	1,64	0,72	0,83	2,01	1,74	12,90	5,70	7,70	6,30	13,30
MgO	1,76	1,06	0,46	5,32	1,61	1,65	5,04	3,54	1,63	5,91	4,65	2,06	4,80	3,10
Na ₂ O	0,55	0,42	0,05	1,77	1,40	0,77	1,62	1,12	1,03	1,59	1,75	1,19	2,30	1,39
K ₂ O	0,26	0,18	0,09	0,52	0,92	0,16	0,72	0,88	0,59	0,33	0,36	0,29	0,41	0,34
P ₂ O ₅	0,13	0,06	0,03	0,30	0,06	0,12	0,20	0,07	0,04	0,14	0,16	0,22	0,27	0,24
CuO	0,31	8,93	23,55	0,29	2,70	22,40	0,62	9,59	13,38	0,10	0,02	0,02	0,03	0,02
S	0,04	0,57	9,33	<0,01	0,04	0,06	<0,01	0,02	0,03	0,02	<0,01	0,01	0,01	0,01
ППП/LOI	10,00	11,60	24,00	11,10	7,90	23,20	7,50	11,02	11,12	16,58	6,68	7,20	8,41	13,71
Сумма/Total	99,38	98,24	100,58	99,38	98,67	98,55	97,08	98,80	98,82	100,40	98,82	96,01	98,85	98,83
Li	10	11	1,5	21,8	12	16,2	17	28	14	9	15	15,8	23,9	16,4
Be	0,19	0,19	0,14	–	0,32	–	0,31	0,5	0,36	0,2	0,31	–	–	–
Sc	6	5	2,1	20	7	17	10	17	7	21	11	12	20	13
V	40	60	190	121	90	123	90	130	130	200	80	53	129	63
Cr	100	130	60	1138	700	372	800	1130	900	2300	250	155	405	211
Mn	1100	190	180	–	180	–	380	400	400	1200	400	–	–	–
Co	7	30	160	26	15	13	22	70	80	25	12	11	21	13
Ni	60	70	280	352	80	106	170	260	110	230	110	106	227	133
Zn	13	15	9	64	23	21	30	50	30	50	30	16	75	24
Ga	3	4	2,5	–	6	–	6	9	7	9	6	–	–	–
Ge	0,8	22	220	–	4	–	6	14	12	1	0,8	–	–	–
As	0,53	29,1	251	–	1,3	–	2,4	2,8	4,5	2,2	0,53	–	–	–
Se	0,28	4,6	10,3	–	0,28	–	0,35	0,72	1,21	0,62	0,3	–	–	–
Rb	14	14	3,2	–	14	–	19	32	25	14	19	–	–	–
Sr	80	400	260	151	100	95	100	110	120	170	100	116	148	151
Y	8	5	4	18	5	12	10	8	16	12	12	12	177	12
Zr	29	30,8	19	128	61	33	56	75	67	63	58	88	116	88
Nb	2,6	2,6	0,6	–	4,1	–	4	5,5	5,2	5,4	5	–	–	–
Mo	0,5	14	110	–	3,1	–	1,4	1,1	3,1	0,5	0,4	–	–	–
Ag	2,3	30	150	–	15	–	4,8	18	20	0,34	0,17	–	–	–
Cd	0,03	<0,01	<0,01	–	0,03	–	0,04	0,06	0,05	0,05	0,04	–	–	–
Sn	0,5	0,4	0,1	–	0,7	–	0,6	0,6	0,51	0,7	0,6	–	–	–
Sb	0,16	1	9	–	0,4	–	0,4	0,3	0,4	0,21	0,18	–	–	–
Te	0,021	0,031	0,023	–	0,046	–	0,018	0,032	0,045	0,018	0,014	–	–	–
Cs	0,42	0,47	0,11	–	0,8	–	0,6	1,1	0,8	0,46	0,6	–	–	–
Ba	110	200	180	176	150	403	180	170	200	120	120	139	216	150
La	4	4	0,8	12	3,3	3	5	6	5	10	7	7	13	9
Ce	8	7	1,8	9	6	7	11	10	11	18	12	1,6	13	<1,0
Pr	1,1	0,9	0,26	–	0,7	–	1,5	1,3	1,1	2,3	1,7	–	–	–
Nd	5	3,4	1,2	–	2,5	–	6	5	4,2	10	7	–	–	–
Sm	1	0,7	0,36	–	0,49	–	1,5	1,1	0,9	2,2	1,6	–	–	–
Eu	0,3	0,2	0,1	–	0,2	–	0,5	0,4	0,3	0,7	0,5	–	–	–
Gd	1,3	0,8	0,5	–	0,6	–	1,7	1,3	1,0	2,8	2,0	–	–	–
Tb	0,2	0,1	0,1	–	0,1	–	0,3	0,2	0,2	0,4	0,3	–	–	–
Dy	1,2	0,8	0,6	–	0,8	–	1,7	1,6	1,6	2,6	1,9	–	–	–
Ho	0,2	0,2	0,1	–	0,2	–	0,4	0,4	0,4	0,6	0,4	–	–	–
Er	0,7	0,6	0,4	–	0,6	–	1,1	1,1	1,4	1,6	1,2	–	–	–
Tm	0,1	0,1	0,1	–	0,1	–	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	–	–	–
Yb	0,7	0,6	0,4	–	0,7	–	1,0	1,2	1,5	1,4	1,1	–	–	–
Lu	0,1	0,1	0,1	–	0,1	–	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	–	–	–
Hf	0,7	0,7	0,3	–	1,3	–	1,4	1,9	1,5	1,5	1,3	–	–	–
Ta	0,2	0,2	0,1	–	0,3	–	0,3	0,4	0,3	0,4	0,3	–	–	–
W	0,3	0,4	0,28	–	0,5	–	0,4	0,5	0,6	1,2	0,4	–	–	–
Tl	0,4	1	4,8	–	0,2	–	0,15	0,19	0,24	0,05	0,05	–	–	–
Pb	2,4	26	270	7	15	88	6	19	22	2,9	2,3	10	4,3	10
Bi	0,016	0,024	0,002	–	0,044	–	0,027	0,05	0,046	0,054	0,014	–	–	–
Th	0,9	1	0,19	–	1,1	–	1,3	2,1	1,1	1,3	1,3	–	–	–
U	0,9	6	10	–	4,5	–	1,5	3,9	8	0,9	0,9	–	–	–

Примечание: 1–9 – руды: 1, 4, 7 – внешняя зона рудных тел, 2, 5, 8 – средняя часть рудных тел, 3, 6, 9 – внутренняя часть рудных тел; 10–14 – песчаники: 10 – надрудный песчаник с хромитовыми прослойками, 11–13 – надрудные песчаники, 14 – известково-песчаный материал из трещины; FeO_i=FeO+Fe₂O₃, * микроэлементы определены методом ICP AES, остальные – ICP MS; < – ниже предела обнаружения, «–» не определялось.

Note: 1–9 – ores: 1, 4, 7 – outer part of ore bodies, 2, 5, 8 – middle part of ore bodies, 3, 6, 9 – inner part of ore bodies; 10–14 – sandstones: 10 – overlying sandstone with chromite layers, 11–13 – overlying sandstones, 14 – lime-sandy material from fault; FeO_i=FeO+Fe₂O₃, * trace elements determined by ICP AES, others – ICP MS; < below detection limit, «–» not determined.

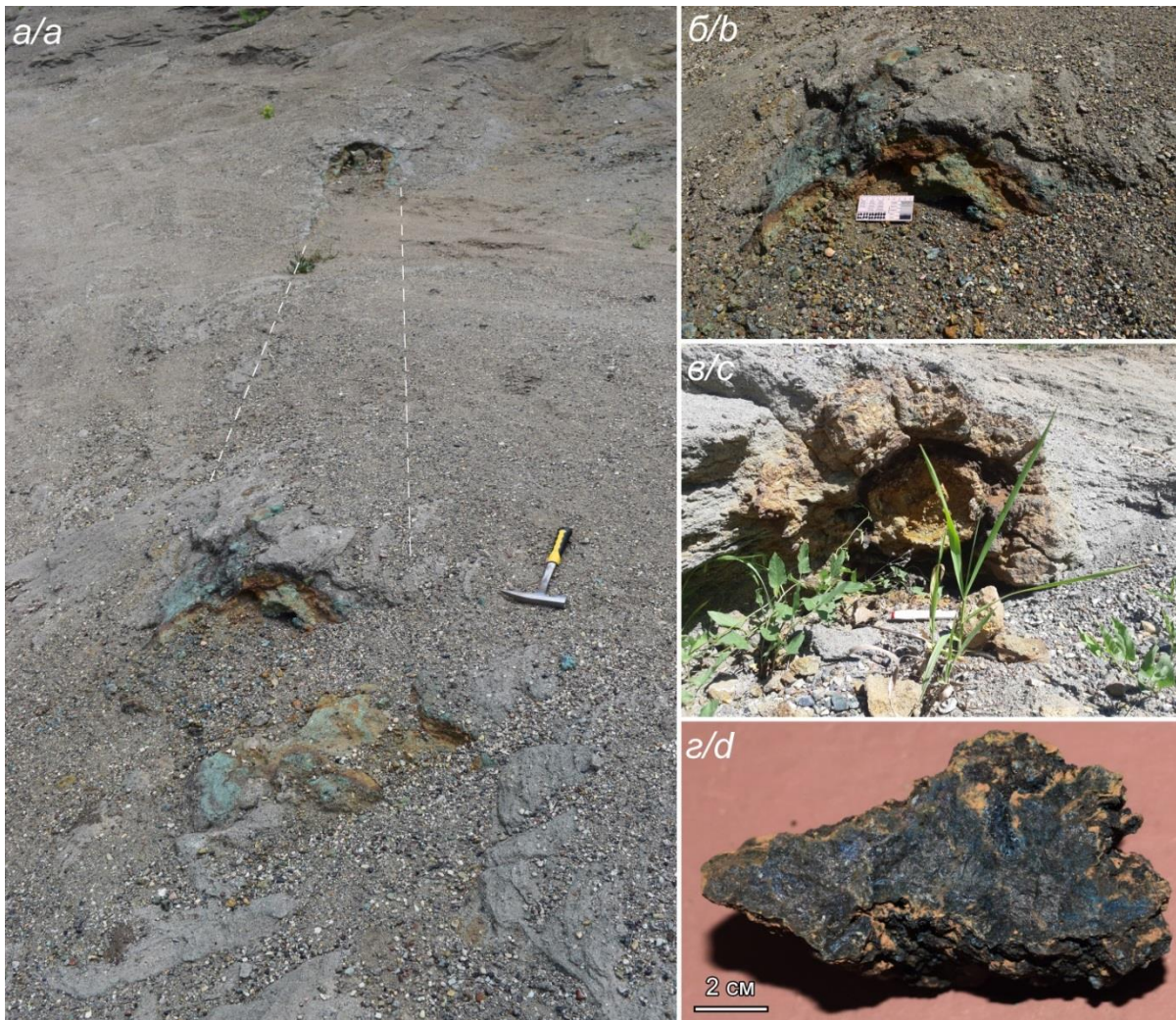


Рис. 2. Руды Базилевского медного рудопроявления: а) рудное тело № 5 во вмещающих породах; б) деталь снимка (а); в) рудное тело № 1 в поперечном сечении; г) фрагмент внутренней сульфидной оболочки рудного тела № 4

Fig. 2. Ores of the Bazilevo copper occurrence: a) ore body no. 5 in host rocks; b) detail of (a); c) ore body no. 1 in cross-section; d) fragment of inner sulfide shell of ore body no. 4

Таблица 2. Параметры рудных тел Базилевского медного рудопроявления

Table 2. Parameters of ore bodies of the Bazilevo copper occurrence

№ рудного тела No. of ore-body	Длина, м Length, m	Диаметр, м Diameter, m	Простираание, ° Strike, °	Тип зональности Type of zoning
1	>1	0,40	90	II
2	>1	0,20	88	III
3	>1	0,30	96	III
4	>22	0,60	85	I-II
5	>9	0,70	96	II
6	>40	0,70	48	II-III
7	>1	0,45	83	II
8	>3	0,40	67	I
9	>4,5	0,35	85	II
10	>1	0,50	87	II

По внутреннему строению (в поперечном сечении) установлено три типа рудных тел:

I. Первый концентрически-зональный тип. Центральная часть (5–10 см) сложена охристо-чёрным углистым материалом с остатками древесины, ко-

торый заключён в «сульфидную» оболочку (обогащённую сульфидами часть рудного тела) чёрного цвета толщиной до 10 см. Сульфидная оболочка окружена песчаным материалом (30–35 см) с цементом из сине-зелёных гидрокарбонатов Cu (азурит и малахит) и бурых гидроксидов Fe. Во внешней оболочке иногда снова появляется тонкая сульфидная оторочка (1–3 см) тёмно-серого цвета со смесью ржаво-коричневых и синезелёных полос с отпечатками структуры древесины. Краевая часть (сильно изменчивая по мощности – 1–25 см) выполнена песчано-гравийным материалом серого, ржаво-бурого и синезелёного цвета, сцементированным гидроксидами Fe и гидрокарбонатами Cu.

II. Второй концентрически-зональный тип. Центральная часть (15–20 см) сложена желтовато-бурым с пятнами синей и зелёной окраски песчаным материалом с цементом из гидроксидов Fe и гидрокарбонатов Cu. Выявляется кольцевая зональность в распределении бурой окраски. Внутренняя часть окружена зоной тёмно-бурого рых-

лого материала (4–7 см) с фрагментами углефицированной древесины. Присутствуют твёрдые участки синего и зелёного цвета. На границе с центральной зоной наблюдается тонкий охристый слой. Далее следует слой рыжевато-гравелистого песчаника (6–8 см) с пятнами синего и зелёного цвета. Он окружён тонкой (0,2...0,5 см) тёмно-бурой сульфидной оболочкой. Краевая часть имеет неравномерную толщину (от 2 до 15 см) и представлена жёлто-бурым песчаником.

III. Незональный тип. Древесина полностью замещена песчаным рыжевато-бурым материалом с пятнами синей и зелёной окраски, в котором развиты гидркарбонаты Си и гидроксиды Fe.

В некоторых рудных телах по длине наблюдается переход от одного типа к другому (табл. 2).

Минералогия и геохимия руд

Детальные минералогические и геохимические исследования проводились в двух рудных телах – № 5 и 9 (табл. 2). По результатам рентгенофазового анализа (рис. 3) в рудах диагностированы следующие минералы: малахит, азурит, пирит, халькозин, борнит, халькопирит, ковеллин, кубанит, куприт, гётит. Среди них наиболее распространены малахит (15–35 %), азурит (15–30 %), пирит (7–35 %), халькопирит (5–20 %). Количества других минералов обычно не превышают 5–10 % для каждого.

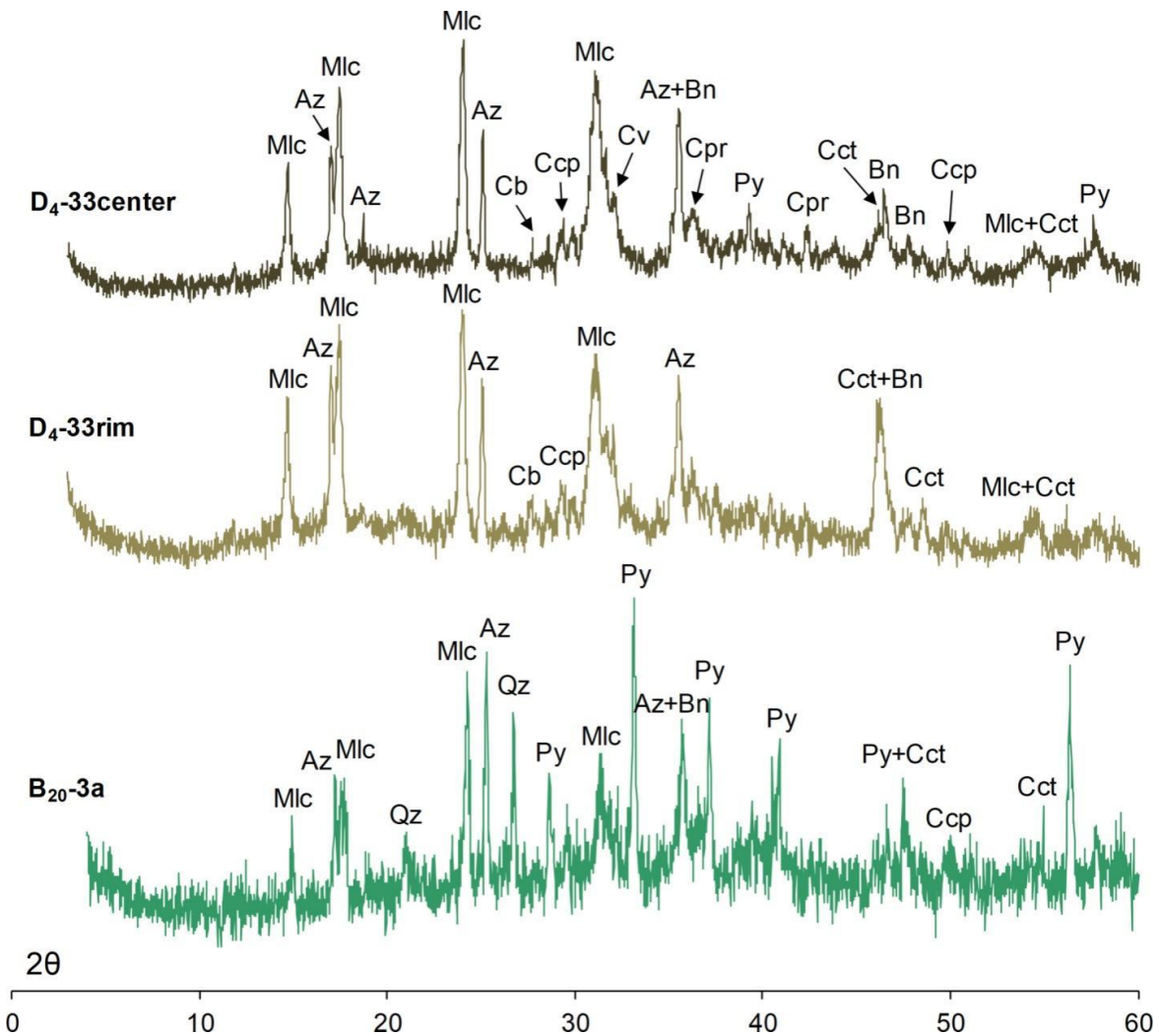


Рис. 3. Дифрактограммы порошковых проб руд Базилевского медного рудопоявления: Az – азурит, Bn – борнит, Cb – кубанит, Ccp – халькопирит, Cct – халькозин, Cpr – куприт, Cv – ковеллин, Mlc – малахит, Py – пирит, Qz – кварц

Fig. 3. XRD powder patterns of copper ores from Bazilevo ore occurrence: Az – azurite, Bn – bornite, Cb – cubanite, Ccp – chalcocopyrite, Cct – chalcocite, Cpr – cuprite, Cv – covellite, Mlc – malachite, Py – pyrite, Qz – quartz

С помощью оптической и электронной микроскопии с рентгеноспектральным микроанализом подтверждено наличие минералов, выявленных дифрактометрией, и установлены их взаимоотношения. Кроме того, обнаружены такие минералы, как брошантит и барит. Основная часть азурита и малахита находится

в мелкодисперсной форме в цементе песчаной части рудных тел (рис. 4, а), окружающей сульфидизированные части древесных стволов. Хотя они также присутствуют и в массе сульфидных оболочек. Азурит также был встречен в виде тонких жил, прорывающих сульфидные агрегаты (рис. 4, б).

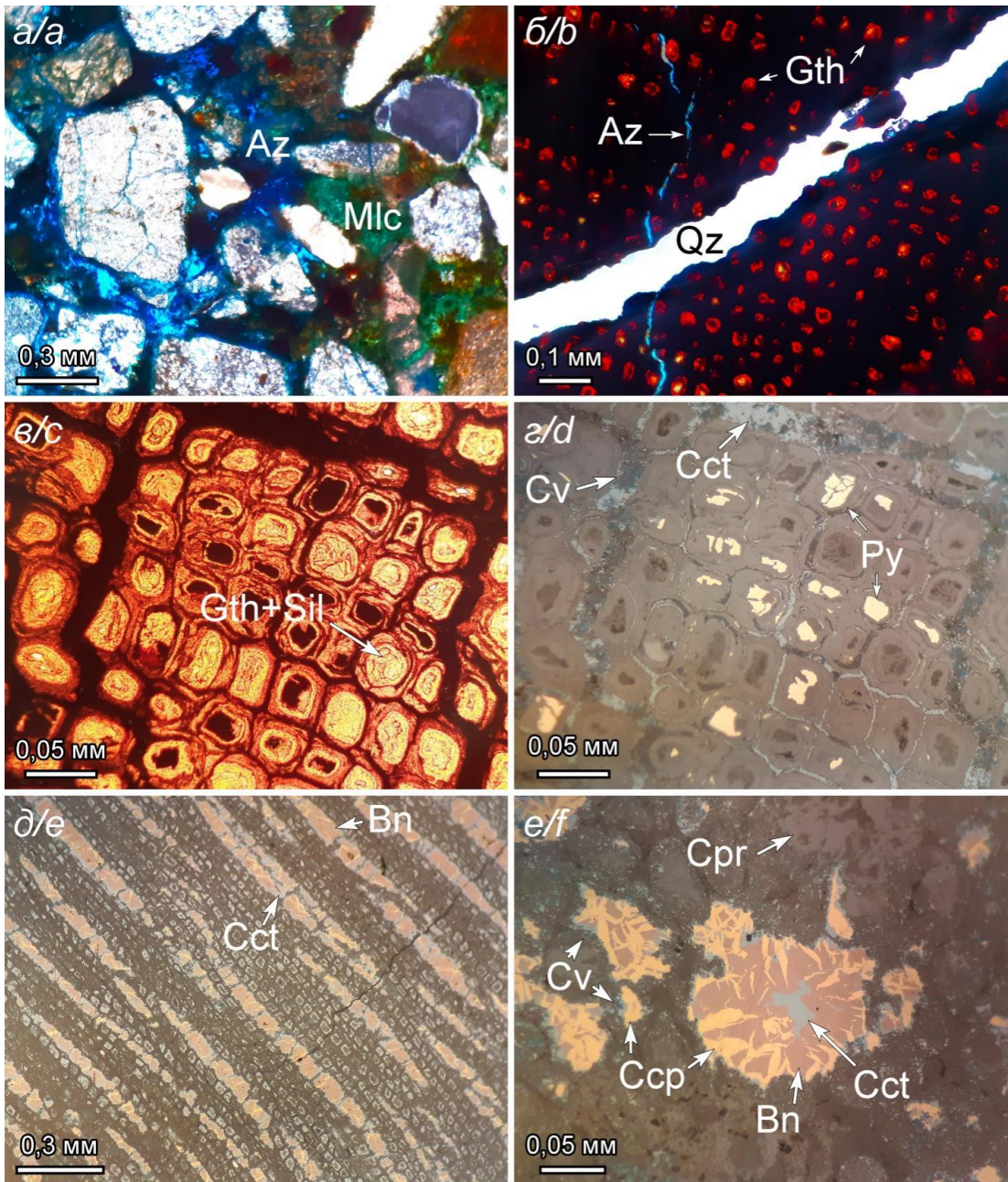


Рис. 4. Микрофотографии руд Базилевского медного рудопроявления: а) азурит и малахит в цементе песчаника; б) минеральный агрегат в структуре древесной ткани, пересечённый жилкой азурита и последующей жилкой кварца; в, г) деталь минерализованной древесной ткани; д) сульфиды меди в структуре древесной ткани; е) зональное сульфидное зерно. Примечание: Az – азурит, Bn – борнит, Ccp – халькопирит, Cct – халькозин, Cv – ковеллин, Gth – гётит, Mlc – малахит, Py – пирит, Qz – кварц, Sil – кремнезём

Fig. 4. Photomicrographs of ores of the Bazilevo copper occurrence: a) azurite and malachite in sandstone cement; b) mineral assemblage replaced wood, cutting by the azurite vein and late quartz vein; c, d) detailed localities of mineralized wood tissue; e) Cu sulfides replaced wood; f) polymineral sulfide grain. Note: Az – azurite, Bn – bornite, Ccp – chalcocopyrite, Cct – chalcocite, Cv – covellite, Gth – goethite, Mlc – malachite, Py – pyrite, Qz – quartz, Sil – silica

В сульфидной оболочке руд хорошо выражена сохранившаяся текстура древесной ткани, замещённая сульфидами и оксидами (рис. 4, б–д). Между ячейками (бывшими клетками и ситовидными трубками) частично сохранилось углефицированное органическое вещество (фитолейма). В строении отдельных ячеек отмечается зональность: ядра сложены пиритом, внешние оболочки – халькозином (иногда с оторочкой ковеллина). Иногда встречаются ячейки, нацело

выполненные пиритом (сферолиты с диаметром 10–15 мкм). Однако часто сульфиды замещены кремнезёмом (халцедоном и опалом), гидроксидами Fe или гидрокарбонатами Cu (рис. 4, в, г). На границе сульфидной и песчаной оболочек рудное вещество представлено тонкодисперсной смесью сульфидов, гидрокарбонатов, сульфатов и гидросульфатов, в которой сложно диагностировать отдельные минеральные фазы. Борнит представлен удлинёнными агрега-

тами 30–80 мкм в толщину, внешние каймы которых сложены халькозином (рис. 4, *д*). Кроме того, борнит встречается в зональных сульфидных агрегатах, окружая халькозин, слагающий центральную часть, а по краям борнит обрастает замещающим его халькопиритом (рис. 4, *е*). Ковеллин встречается по краям полиминеральных агрегатов (рис. 4, *е*), а также в скоплениях, состоящих из пластинчатых зёрен, окружённых азурином. Куприт представлен прожилковидными выделениями в мелкодисперсной матрице, состоящей из смеси халцедона и сульфидов, сульфатов с гидрокарбонатами Cu и гидроксидами Fe (рис. 4, *е*; 5, *а*). В этой смеси также встречаются отчётливые ксеноморфные и редко идиоморфные выделения барита размером до 0,4 мм (рис. 5, *а*). Кубанит выявлен в форме тончайшей венообразной сети прожилков в пирите (рис. 5, *а*). Брошантит образует

сплошные тонкодисперсные выделения в сульфидно-гидрокарбонатной смеси или сложную сеть тонких прожилков вместе с азурином по борниту. Агрегаты рудных минералов местами пересечены тонкими кварцевыми жилами (рис. 4, *б*).

На рис. 5 показаны ЭДС-карты распределения отдельных химических элементов в одном из участков руды, в котором развиты и сульфидные, и гидрокарбонатные минералы Cu. Распределение Cu достаточно равномерно по всей поверхности образца (рис. 5, *б*) (исключая прожилков пирита) за счёт вхождения этого элемента в состав и сульфидных, и гидрокарбонатных фаз. Распределение S и Fe во многом сходно (рис. 5, *в*, *г*), поскольку они совместно входят в состав пирита, борнита и кубанита. Ва сконцентрирован почти исключительно в барите (рис. 5, *д*), Ag слабо концентрируется в барите, но в основном рассредоточено по образцу (рис. 5, *е*).

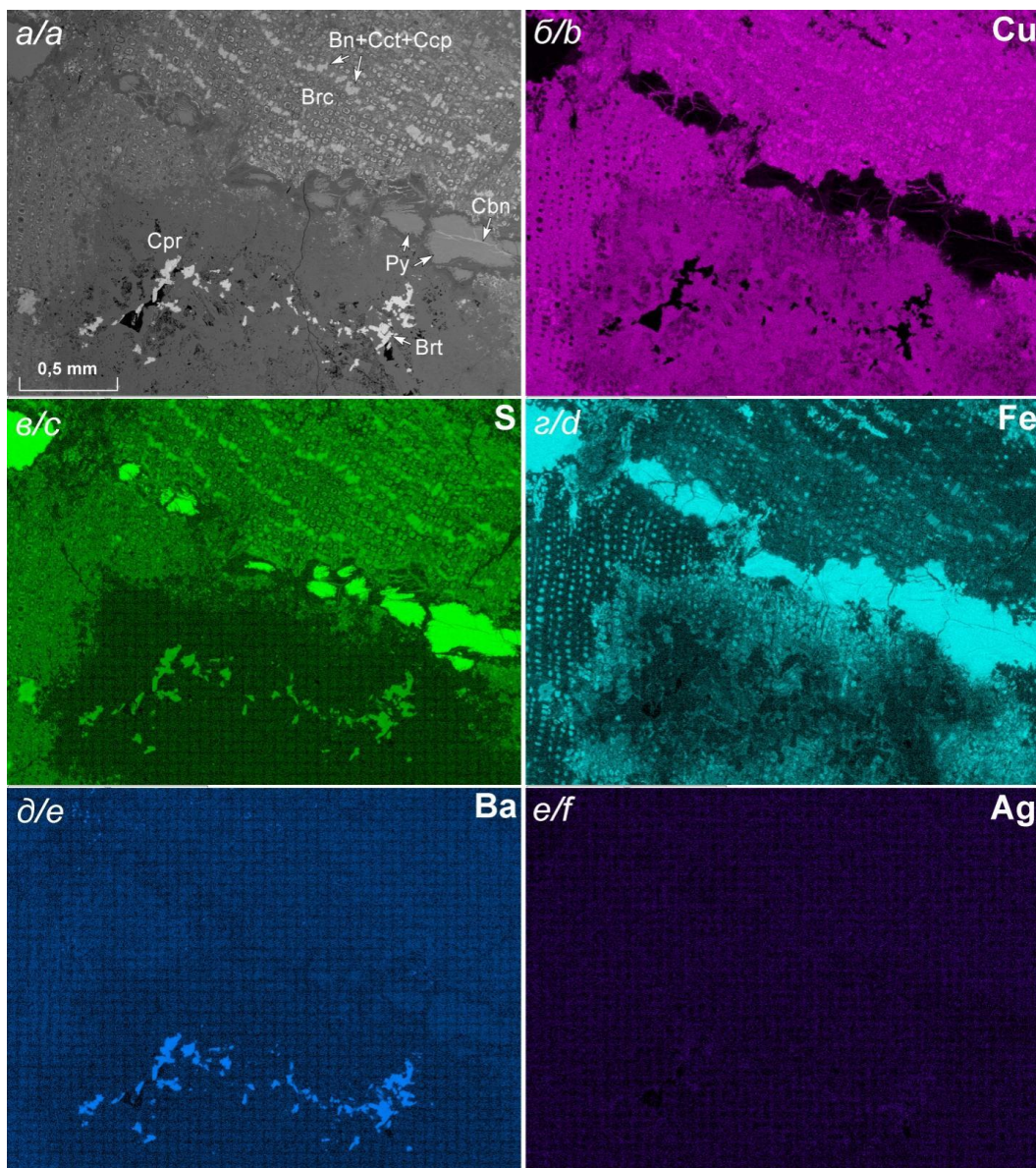


Рис. 5. BSE-изображение полированного участка рудного образца (*а*) и ЭДС-карты распределения химических элементов (*б–е*) на этом участке

Fig. 5. BSE-image of polished section of hand specimen (*a*) and EDS-maps of some chemical element distribution (*b–f*) on this locality

Содержание Cu в рудах варьирует от 0,2 до 18,8 мас. %, в среднем составляя 7,2 %. Наиболее высокие содержания Cu выявлены во внутренних оболочках рудных тел (10,7...18,8 мас. %), в особенности – в сульфидных (9,3 мас. % S), а во внешних оболочках содержится от 0,2 до 7,7 мас. % Cu. Содержания Fe (FeO_t , 2,5...30,7 мас. %) слабо коррелируют с Cu, что может быть связано с некоторыми различиями распределения в рудах сульфидов железа и меди. В изученных образцах встречаются участки с преобладающим развитием либо сульфидов Cu (борнита, халькозина, ковеллина), либо Fe (пирита). Выявлена отрицательная корреляция между содержаниями Cu и Ca ($R^2=0,6$). В богатой сульфидами пробе установлены высокие концентрации Ag и Pb – 150 и 270 г/т соответственно (проба В₂₀₋₃, табл. 1). При этом количества данных элементов снижаются в направлении от центров рудных тел к перифериям. Максимальные концентрации As, Se, Ag, Pb, Co и Ni также приурочены к богатой сульфидами медной руде, что определяет тесную связь указанных элементов с сульфидными минералами. Наиболее схожи между собой распределения As, Se, Ag, Pb, Co и S. Концентрации Zn меняются незакономерно в разных рудных телах, а содержания Ba во всех пробах руд очень стабильны и характеризуются слабыми вариациями.

Обсуждение результатов

Источники сноса и палеогеография отложений

Петрографическое изучение песчаников, вмещающих рудные тела Базилевского медепоявления, показало, что источником обломочного материала служили в основном метаморфические и осадочные комплексы. Согласно ранее проведённым исследованиям на протяжении всего пермского периода снос терригенного материала в области осадконакопления восточной части Восточно-Европейской платформы происходил со складчатого Урала [20, 21]. Показано, что песчаники молассовой формации в южной части Предуральяского прогиба, к которым отнесены и породы казанского яруса [21], формировались за счёт разрушения вещественных комплексов складчатонадвигового пояса с выведенными на поверхность коллизионными сутурами, а также продуктов рециклированного орогена. Большинство детритовых цирконов из песчаников молассовой формации имеют протерозойский U-Pb изотопный возраст, меньшая часть – раннепалеозойский [21]. Таким образом, в качестве основного поставщика обломочного материала для изучаемых песчаников предполагаются рифейские осадочно-метаморфические комплексы Башкирского мегантиклинория Южного Урала [20].

Проведённые структурно-текстурные исследования пород позволяют определить условия их накопления. Однонаправленная линзовидно-косая слоистость с довольно крутыми углами наклона (до 35°) наряду со слабой окатанностью обломков и средней-хорошей сортировкой терригенного материала при общем погружении материала сверху вниз в разрезе являются характерными признаками речных отложений [22, 23]. Преимущественно песчаный материал

отложений отвечает фации аллювиальной равнины, присутствие грубообломочных отложений связано с увеличением гидродинамической активности среды осадконакопления [22]. Судя по направлению слоёв в косых сериях, движение потока шло с востока на запад. Наличие древесных фоссилий свидетельствует о наличии прирусловых отмелей, отгороженных береговыми барами [23, 24]. Деревья могли быть как перенесёнными речным потоком, так и упавшими вблизи места произрастания. Наклонное положение рудных тел в разрезе говорит о том, что один конец дерева мог находиться на берегу, а другой – в воде, направляясь водным потоком. В изученном разрезе выявлено два рудных горизонта с разным простиранием минерализованных деревьев (нижний вскрыт слабее), что может говорить, во-первых, о смене направления течения во времени, и во-вторых, о наличии на глубине ещё не одного горизонта с рудными телами.

Некоторые микроэлементы очень чувствительны к изменениям физико-химических условий осадконакопления и используются для реконструкции среды образования осадков [25, 26]. Как отмечено выше, в песчаниках Базилевского рудопоявления величина Sr/Ba < 1 в большинстве проб, что свидетельствует о формировании песчаников в континентальных условиях, подтверждая их речную природу [27, 28]. В двух пробах с повышенным содержанием Ca увеличение Sr/Ba отношения (1–1,4), возможно, связано с наложенными процессами кальцитизации. Величина $V/(V+Ni) < 0,5$ во всех пробах характеризует окислительную обстановку водной среды [29, 30].

Древесная растительность среднепермского времени территории современного Предуралья была представлена хвойными, древовидными папоротниковыми, плауновидными, хвощевидными и др. семействами [31]. Судя по размерам древесных фоссилий, морфологии поверхности стволов, текстуре и структуре древесной ткани, минерализованные деревья Базилевского рудопоявления принадлежали одному из семейств хвойных голосеменных растений. Отметим, что в Каргалинских рудниках, находящихся в 120 км южнее Базилево, медная минерализация была приурочена, в том числе, к хвойным из родов *Sashimia* и *Geinitzia*, предполагается также присутствие кордаитов [5].

Условия образования медных руд

Знания особенностей генезиса позволяют оценить перспективы выявленного оруденения, а также прогнозировать обнаружение новых объектов. В целом, рассматривая геолого-литологические особенности размещения медной минерализации в Южном Предуралье, мы выделяем два главных типа рудных залежей: 1) субпластовые, приуроченные к литологическим границам, обычно к горизонтам развития тонко распылённого органического вещества; 2) штокверки, приуроченные к растительным и животным остаткам – стеблям и древесине, скелетам позвоночных. Возраст медного оруденения, приуроченного к пермским глинисто-терригенным отложениям Южного

Предуралья, оценивается как ранне- или среднемезозойский [2].

Морфология и размеры рудных тел во многом зависят от положения и распределения в разрезе органического вещества [32]. Органическое вещество является биохимическим барьером (восстановителем окисленных растворов), обуславливающим осаждение минералов меди. Общим механизмом для таких рудопроявлений считается первичное осаждение сульфидов Fe (пирита, марказита) при синседиментационных или диагенетических процессах на органическом восстановителе (растительные остатки) в результате деятельности сульфатредуцирующих бактерий [12, 33]. Для реализации процесса минерализации древесной ткани (petrified или permineralization) захоронение стволов должно было произойти быстро, чтобы предотвратить интенсивное гниение древесины. Хорошая сохранность клеточной структуры свидетельствует о достаточно быстром процессе сульфидизации fossilized древесины [34]. Впоследствии сульфиды Fe замещаются сульфидами Cu (халькозином, борнитом, кубанитом, халькопиритом) за счёт наложения Cu-содержащих флюидов из нижележащих слоёв [12]. В дальнейшем миграция окисленных вод в поровом пространстве приводит к частичному растворению сульфидов и образованию за счёт них поздних сульфатов и гидрокарбонатов Cu, а также гидроксидов железа.

В разрезе Базилевского карьера рудные тела исключительно отвечают штокверкам. В изученном медном проявлении перечисленные выше процессы отражены в особенностях вещественного состава и минералогии: сохранившееся углефицированное органическое вещество и текстуры древесной ткани, замещение органики сульфидами и оксидами, широкое развитие гидроксидов Fe и гидрокарбонатов Cu, переменивый состав и сложные взаимоотношения минеральных фаз с пересечением и замещением одних другими. Всё это говорит о схожем с вышеописанным механизмом формирования руд. Таким образом, изученная медная минерализация имеет полигенное происхождение. Выявленные особенности позволяют предположить четыре стадии минералообразования в изученных рудах: 1) возникновение пирита на органическом восстановителе за счёт деятельности сульфатредуцирующих бактерий; 2) замещение сульфидов Fe сульфидами Cu (пиритовые ячейки окружены медными жилами либо замещены медными минералами) при циркуляции Cu-содержащих растворов; 3) развитие гидрокарбонатов Cu при циркуляции и взаимодействии окисленных водных растворов (Cu-содержащих?) с карбонатом из цемента песчаников и частичным растворением сульфидов Fe и Cu; 4) образование гидроксидов Fe, ассоциирующих с кварцевыми жилами, секущими медные руды.

Общим для многих осадочных проявлений меди является их тесная связь с красноцветными отложениями, рассматриваемыми в качестве источника Cu [1, 10]. Отмечается важнейшая роль разрывных нарушений, обеспечивающих миграцию рудоносных флюидов [11]. Руды Базилевского проявления зале-

гают в коричнево-серых песчаных отложениях (предположительно – нижний подъярус), а красноцветные породы (верхний подъярус), судя по геологическому строению района, залегали стратиграфически выше и впоследствии были эродированы. Ниже меденосного горизонта залегают голубовато-серые и зеленовато-серые морские терригенно-глинистые породы, известняки, эвапориты и красноцветные терригенные отложения средней–ранней перми [17]. Проведённые нами наблюдения показывают, что, во-первых, образование медных руд произошло позже формирования песчаных отложений (эпигенетический тип) и, во-вторых, возникновение медной минерализации могло быть связано с разрывными нарушениями, обеспечившими возможность миграции минералообразующих растворов. В 2021 г. из изученных нами 23 разрезов на площади >1000 кв. км в Южном Предуралье только в трёх была обнаружена медная минерализация, при том что fossilized растительные остатки присутствуют почти в каждом из этих разрезов. Хотя красноцветные терригенные отложения верхнеказанского подъяруса на данной площади распространены очень широко. Данный факт свидетельствует о поступлении меди не из вышележащих красноцветных толщ, а из нижезалегающих пород при движении восходящих потоков (эксфильтрационный класс месторождений [35]) по разрывным нарушениям. Отметим, что признаками эксфильтрационных месторождений являются связь рудных тел с разломами и наличие в разрезе, с одной стороны, эвапоритов, а с другой – красноцветных толщ [35]. Температура минералообразования в таких месторождениях оценивается в 50–100 до 200–300 °C [36]. Мы полагаем, что также нельзя исключать вероятность поступления рудного вещества из более древних нижезалегающих медных руд (медистых песчаников).

Особенности распределения микроэлементов используются для реконструкции условий формирования медистых песчаников [2]. Низкая величина Co/Ni (0,07...0,57) в рудах может быть обусловлена воздействием низкотемпературных метеорных вод [37]. Величины европиевой ($\delta Eu = 0,83...1,04$) и цериевой ($\delta Ce = 0,83...1,12$) аномалий в изученных пробах сходны с таковой для медистых песчаников Оренбургского Предуралья, локализованных в верхнепермских отложениях [2], и свидетельствуют об умеренно окислительной обстановке Cu-минерализации. Характер спектров распределения редкоземельных элементов (REE) в них также очень близок с относительной обогащённостью LREE и в меньшей мере HREE по сравнению с MREE (рис. 6). Схожая картина распределения REE наблюдается и в рудах месторождения Синьчжай в Северном Лаосе, для которого предлагается близкая к описанной выше для Базилевского рудопроявления модель формирования [13]. В медных рудах Купфершифера в Польше хондрит-нормированное распределение REE также схожее, но в них отмечается более высокое содержание REE в сравнении с тремя вышеуказанными проявлениями [38]. Приведённые данные свидетельствуют о близости Базилевского Cu-проявления не только к Манс-

фельдскому (Купфершифер) типу месторождений, как это отмечалось ранее [39], но и к типу Манто [2]. Отметим, что и для первого, и для второго типов

предполагается связь Cu-минерализации с гидротермально-метасоматическими флюидами, источниками которых являлись магматические тела [15, 40].

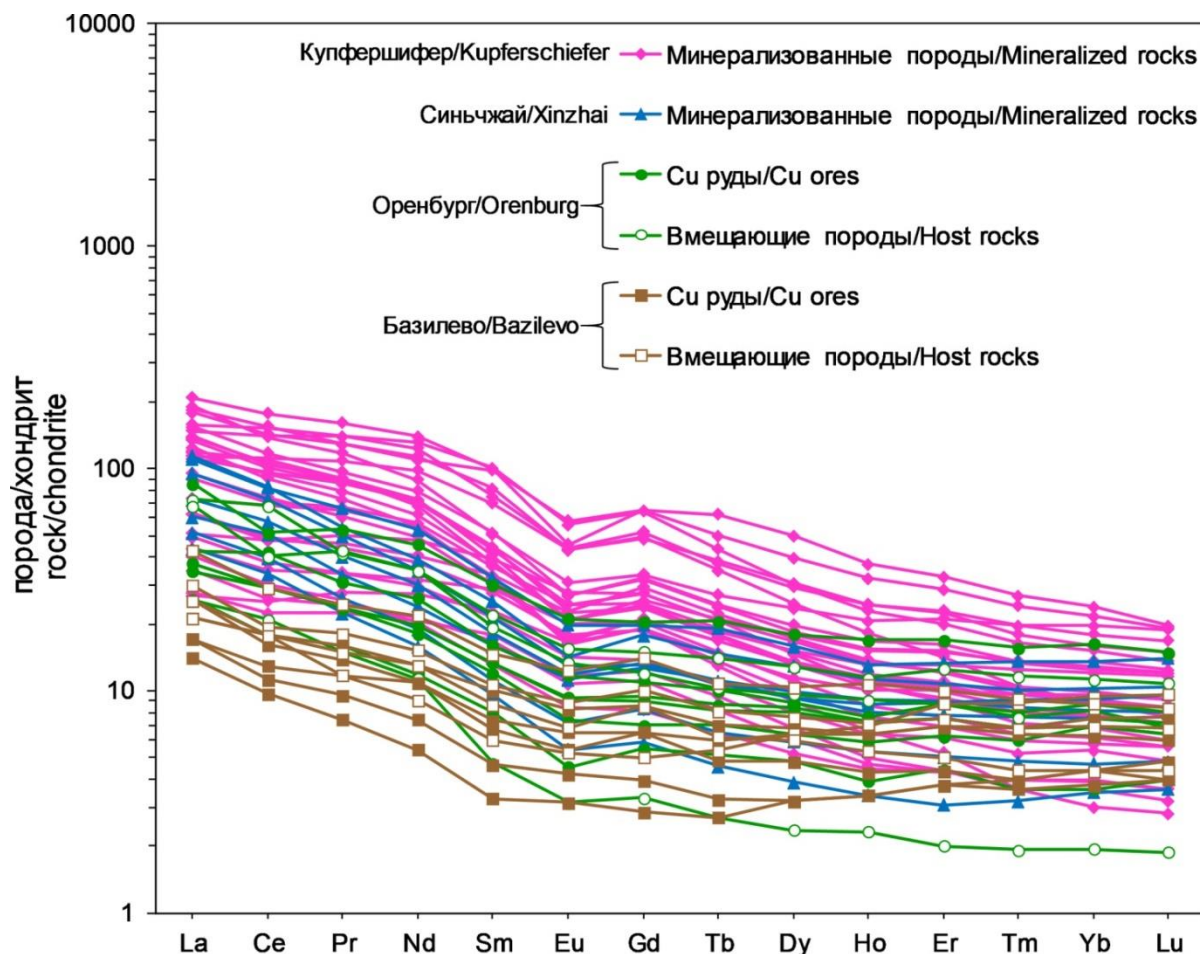


Рис. 6. Хондрит-нормированная диаграмма распределения редкоземельных элементов в рудах и вмещающих породах разных медных месторождений: Купфершифер по [38], Синьчжай по [13], Оренбуржье по [2], Базилево – авторские данные

Fig. 6. Chondrite-normalized REE patterns in copper ores from different deposits: Kupferschiefer from [38], Xinzhai from [13], Orenburg from [2], Bazilevo – authors' data

Представляется, что видимые масштабы оруденения на Базилевском проявлении пока не достаточны для промышленного интереса. Однако вскрыта лишь небольшая часть разреза, а рудные тела располагаются на разной глубине в разрезе, что позволяет рассчитывать на количественное наращивание руды как по литорали, так и по вертикали. Многие известные в регионе месторождения имеют ярусное строение. Из десяти вскрытых в разрезе рудных тел ни одно не было прослежено целиком. В природе обычно длина хвойных деревьев зависит от диаметра ствола, поэтому мы можем предположить, что рудные тела с большим диаметром будут иметь и большую длину. Это важно для оценки размеров рудных тел в условиях их недостаточной обнаженности. Анализ геохимических данных показывает, что песчаники Базилевского карьера повсеместно заражены медью. Высокие концентрации Cu отмечаются не только в хорошо выраженных рудных телах, но и во вмещающих их песчаных породах. Это даёт основание рассматривать в

качестве объекта добычи не только узкие рудные тела, но и околорудные породы.

Факт обнаружения во вмещающих медепроявление породах хромитоносных прослоев показывает, что изученный стратиграфический горизонт является не только меденосным, но и хромитоносным. Механизм образования двух типов минерализации совершенно разный. Но это диктует необходимость дальнейшего более пристального изучения обоих типов минерализации в песчаных отложениях Южного Предуралья. Отметим, что в 15 км к СВ от Базилевского карьера недавно было обнаружено новое Сабантуйское хромитовое россыпное проявление площадью ~20 тыс. м² и содержанием Cr₂O₃ в рудах 2–17 мас. % [8].

Заключение

Изучено новое Базилевское медное рудопроявление в Южном Предуралье, приуроченное к сероцветным терригенным отложениям казанского яруса. Литологические и геохимические данные свидетель-

ствуют о накоплении вмещающих песчаников во флювиальной обстановке. Обнаружено 10 рудных тел линейной морфологии, приуроченных к древесным фоссилиям, вероятно, принадлежащим семейству хвойных. В рудопроявлении выделено два рудных горизонта: к верхнему горизонту приурочено большинство рудных тел, имеющих субширотное простирание (83–96°), а рудное тело нижнего горизонта имеет СВ простирание (48°). В длину они достигают 40 м и более, а в диаметре варьируют от 0,2 до 0,7 м. В поперечном срезе установлено три типа зональности рудных тел: I концентрически-зональный тип с хорошо сохранившимся в центре органическим веществом, широким развитием сульфидов и наиболее высоким содержанием Cu; II концентрически-зональный тип с преимущественно песчаным материалом, сцементированным азуритом и малахитом; III незональный тип, сложенный песчаным материалом, сцементированным гидроксидами Fe и гидрокарбонатами Cu. Согласно выявленной зональности закономерно меняются содержания Cu (от 0,2 до 18,8 мас. %) и других рудных элементов. Наибольшие концентрации Cu, а также Ag (150 г/т), Pb (270 г/т), As (251 г/т), Ni (280 г/т), Co (160 г/т) и др. выявлены в богатых сульфидами рудах.

В целом для изученной медной минерализации предполагается гидротермально-осадочная модель формирования при участии, как минимум на раннем этапе, биогенной составляющей. Минералогические и геохимические данные позволили выделить четыре

стадии минералообразования в рудах: 1) осаждение пирита на углефицированной древесине в результате бактериальной сульфат-редукции; 2) образование сульфидов меди (халькозин, борнит, халькопирит, ковеллин и др.) при циркуляции восходящих Cu-содержащих окисленных растворов; 3) развитие гидрокарбонатов меди (азурит, малахит) при циркуляции окисленных водных растворов, реагирующих с карбонатом из цемента песчаников; 4) образование гидроксидов железа, ассоциирующих с кварцевыми жилами.

В качестве источников Cu предполагаются ниже лежащие терригенные отложения, в особенности красноцветные породы. Источником минералообразующих растворов, вероятно, были погребённые воды из нижних водоносных горизонтов, возможно, смешивавшиеся с метеорными водами.

Работа поддержана грантом Президента Российской Федерации № МК-857.2021.1.5. Полевые исследования и часть аналитических работ проведены при поддержке Госзадания ИГ УФИЦ РАН (№ 0246-2019-0080) и гранта РБ НОЦ-ГМУ-2021. Аналитические исследования, включающие сканирующую электронную микроскопию и ICP MS, выполнены в ЦКП «Геоаналитик» УрО РАН в рамках тем № АААА-А18-118052590029-6 и № АААА-А18-118053090045-8 Госзадания ИГГ УрО РАН. Дооснащение и комплексное развитие ЦКП «Геоаналитик» ИГГ УрО РАН осуществляется при финансовой поддержке гранта Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, Соглашение № 075-15-2021-680.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Габлина И.Ф., Малиновский Ю.М. Периодичность меднонакопления в осадочной оболочке Земли // Литология и полезные ископаемые. – 2008. – № 2. – С. 155–173.
2. Геохимические особенности и условия образования медистых песчаников Оренбургского Предураля / А.В. Волков, И.А. Новиков, А.А. Разумовский, К.Ю. Мурашов, Н.В. Сидорова // Литосфера. – 2018. – № 4. – С. 593–606.
3. Абрамов Б.Н. Особенности распределения благородных металлов в медистых песчаниках Кодаро-Удоканского рудного района // Литосфера. – 2006. – № 4. – С. 168–174.
4. Ефремов И.А. Местонахождения пермских наземных позвоночных в медистых песчаниках юго-западного Приуралья // Известия Академии наук СССР. VII серия. Отделение математических и естественных наук. – 1931. – Вып. 5. – С. 691–704.
5. Гоманьков А.В. Хвойные из пермских отложений Каргалинских рудников (Южное Приуралье) // Палеоботаника. – 2010. – Т. 1. – С. 5–21.
6. Полезные ископаемые Республики Башкортостан (руды меди, цинка, свинца) / Д.Н. Салихов, В.В. Масленников, И.Б. Серавкин, Г.И. Беликова, Б.Г. Галиуллин, В.Н. Никонов. – Уфа: Гилем, 2010. – 376 с.
7. Грек И.О., Долотов Ю.А. Исследования древних рудников в Оренбургской области и Башкирии // Спелестологический Ежегодник РОСИ. – М., 2000. – С. 61–66.
8. Уникальная Сабантуйская хромитовая палеороссыпь в осадочном чехле Восточно-Европейской платформы / И.Р. Рахимов, Д.Е. Савельев, В.В. Холоднов, Д.А. Замятин // Геология рудных месторождений. – 2020. – № 6. – С. 568–573.
9. Харитонов Т.В. Три стадии образования медистых песчаников Пермского края: теоретические рассуждения и поисковые выводы // Проблемы минералогии, петрографии и металлогении. Научные чтения памяти П.Н. Чирвинского. – Пермь: ПГНИУ, 2019. – Вып. 22. – С. 263–272.
10. Лурье А.М. Генезис медистых песчаников и сланцев. – М.: Наука, 1988. – 183 с.
11. Desouky H.A.E., Muech P., Tyler R. The sandstone-hosted stratiform copper mineralization at Mwitapile and its relation to the mineralization at Lufukwe, Lufilian foreland, Democratic Republic of Congo // Ore Geology Reviews. – 2008. – V. 34. – Iss. 4. – P. 561–579.
12. Geology and geochemistry of the sediment-hosted stratabound red bed-type Cu-Pb (Zn-Ag) mineralization in the Dozkand-Moshampa Area, NW Zanjan, Iran / H. Azizi, M.R. Hosseinzadeh, M. Moayyed, K. Siahcheshm // Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie. – 2018. – V. 195. – № 2. – P. 123–143.
13. Huang J., Ren T., Zou H. Genesis of Xinzhai sandstone-type copper deposit in Northern Laos: geological and geochemical evidences // Journal of Earth Science. – 2019. – V. 30. – № 1. – P. 95–108.
14. Subías I.F., Mateo E., García-Veigas J. A model for the diagenetic formation of sandstone-hosted copper deposits in Tertiary sedimentary rocks, Aragón (NE Spain): S/C ratios and sulphur isotope systematics // Ore Geology Reviews. – 2003. – V. 23. – № 1–2. – P. 55–70.
15. Kojima S., Trista-Aguilera D., Hayashi K.-i. Copper deposits based on geochemical studies of North Chilean deposits. Genetic aspects of the Manto-type // Resource Geology. – 2009. – V. 59. – P. 87–98.
16. Турикешев Г.Т.-Г., Данукалова Г.А., Кутушев Ш.И.-Б. Южное Предуралие: география, геология, тектоника и геоморфология. – М.: Изд-во «Инфра-М», 2016. – 260 с.
17. Синицын И.И., Синицына Г.И. Объяснительная записка к геологической карте СССР масштаба 1:200000, лист № 40-XXVI. – М.: Министерство геологии, БГГУ, 1965. – Т. 1. – 170 л. – Инв. номер 7150.
18. Rakhimov I.R., Pushkarev E.V., Gottman I.A. Chromite Paleoplacer in the Permian sediments at the East Edge of the East European Platform: composition and potential sources // Minerals. – 2021. – V. 11. – № 7:691.
19. Шутов В.Д. Классификация песчаников // Литология и полезные ископаемые. – 1967. – № 5. – С. 86–102.

20. Пучков В.Н. Палеогеодинамика Южного и Среднего Урала. – Уфа: ГИЛЕМ, 2000. – 146 с.
21. Литогеохимия терригенных ассоциаций южных впадин Предуралья прогиба / А.В. Маслов, Г.А. Мизенс, Л.В. Бадида, М.Т. Крупенин, Г.М. Вовна, В.И. Киселёв, Ю.Л. Ронкин. – Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2015. – 308 с.
22. Ботвинкина Л.Н. Слоистость осадочных пород. – М.: Изд-во АН СССР, 1962. – 542 с.
23. Черданцева Д.А., Кравченко Г.Г., Краснощёкова Л.А. Условия формирования песчаных пластов-коллекторов яковлевской свиты на территории Лодочного нефтегазоконденсатного месторождения // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 10. – С. 115–127.
24. Тельнова О.П., Шумилов И.Х. Терригенные отложения среднего-верхнего девона бассейна р. Цильма (Средний Тиман) и их палинологическая характеристика // Стратиграфия. Геологическая корреляция. – 2019. – Т. 27. – № 1. – С. 31–56.
25. Yan Y., Xia B., Lin X.J. Geochemistry of the sedimentary rocks from the Nanxiong Basin, South China and implications for provenance, paleoenvironment and paleoclimate at the K/T boundary // Sedimentary Geology. – 2007. – V. 197. – P. 127–140.
26. Gao G., Titi A., Yang S.R. Geochemistry and depositional environment of fresh lacustrine source rock: a case study from the Triassic Bajiantan Formation shales in Junggar Basin, northwest China // Organic Geochemistry. – 2017. – V. 113. – P. 75–89.
27. Cai G.Q., Guo F., Liu X.T. Carbon and oxygen isotope characteristics and palaeoenvironmental implications of lacustrine carbonate rocks from the Shahejie formation in the Dongying Sag // Earth and Environment. – 2009. – V. 37. – P. 347–354.
28. The Sr/Ba ratio response to salinity in clastic sediments of the Yangtze River Delta / A.H. Wang, Z.H. Wang, J.K. Liu, N.C. Xu, H.L. Li // Chemical Geology. – 2021. – V. 559. – P. 119923.
29. Jones B., Manning D.A.C. Comparison of geochemical indexes used for the interpretation of palaeoredox conditions in ancient mudstones // Chemical Geology. – 1994. – V. 111. – P. 111–129.
30. Tribouillard N., Algeo T.J., Lyons T. Trace metals as paleoredox and paleoproductivity proxies: an update // Chemical Geology. – 2006. – V. 232. – P. 12–32.
31. Наугольных С.В. Растительный мир пермского периода: Приуралье // Труды Геологического института. – М.: ГЕОС, 2016. – Вып. 612. – 336 с.
32. Copper deposits in sedimentary and volcanogenic rocks / Ed. by E.B. Tourtelot, J.D. Vine. – Washington: U.S. Dept. of the Interior, Geological Survey, 1976. – 44 p.
33. Механизмы замещения сульфидами меди растительных остатков в пермских отложениях Вятско-Камской меденосной полосы / Р.Р. Хасанов, Р.Р. Гайнов, Е.С. Варламова, А.Ф. Исламов // Ученые записки казанского государственного университета. Естественные науки. – 2009. – Т. 151. – № 4. – С. 162–169.
34. Controls on the pyritization of exceptionally preserved fossils: an analysis of the Lower Devonian Hünshück Slate of Germany / D.E.G. Briggs, R. Raiswell, S.H. Bottrell, D. Hatfield, C. Bartels // American Journal of Science. – 1996. – V. 296. – P. 633–663.
35. Рудничный В.Ф. Основы учения о полезных ископаемых. 3-е изд., испр. и доп. – Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2015. – 245 с.
36. Контарь Е.С. Геолого-промышленные типы месторождений Cu, Zn, Pb на Урале (геологические условия размещения, история формирования, перспективы). – Екатеринбург: Уралнедра, 2013. – 199 с.
37. Trace element and REE geochemistry of the Zhewang gold deposit, southeastern Guizhou Province, China / L. Kun, Y. Ruidong, Ch. Wenyong, L. Rui, T. Ping // Chinese Journal of Geochemistry. – 2014. – V. 33. – P. 109–118.
38. Oszczepalski S., Chmielewski A., Mikulski S.Z. Controls on the distribution of rare earth elements in the Kupferschiefer series of SW Poland // Geological Quarterly. – 2016. – V. 60. – № 4. – P. 811–826.
39. Лурье А.М., Габлина И.Ф. Об источнике меди при формировании месторождений мансфельдского типа в Западном Приуралье // Геохимия. – 1972. – № 1. – С. 75–88.
40. An overview of the European Kupferschiefer deposits / G. Borg, A. Piestrzyński, G.H. Bachmann, W. Puttman, S. Walther, M. Fiedler // Special publication: Society of Economic Geologists (U.S.). – 2012. – V. 16. – P. 455–486.

Поступила: 29.09.2021 г.

Информация об авторах

Рахимов И.Р., кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории магматизма и метаморфизма Института геологии Уфимского федерального исследовательского центра РАН.

Мичурин С.В., кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории геохимии и изотопной геологии Института геологии Уфимского федерального исследовательского центра РАН.

Султанова А.Г., младший научный сотрудник лаборатории геохимии и изотопной геологии Института геологии Уфимского федерального исследовательского центра РАН.

Киселёва Д.В., кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории физических и химических методов исследования Института геологии и геохимии им. А.Н. Заварицкого Уральского Отделения РАН.

Карамова А.М., кандидат химических наук, старший научный сотрудник лаборатории геохимии и изотопной геологии Института геологии Уфимского федерального исследовательского центра РАН.

UDC 553.06, 553.2

MINERALOGY, GEOCHEMISTRY AND GENESIS OF THE BAZILEVO COPPER OCCURRENCE (SOUTHERN PRE-URALS)

Ildar R. Rakhimov¹,
rigel92@mail.ru

Sergey V. Michurin¹,
s_michurin@mail.ru

Anna G. Sultanova¹,
anna_zakharova.ig@mail.ru

Daria V. Kiseleva²,
kiseleva@igg.uran.ru

Alsu M. Karamova¹,
alsu.2013@bk.ru

¹ Institute of Geology, Ufa Federal Research Center RAS,
16/2, K. Marks street, Ufa, 450077, Russia.

² A.N. Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry Ural Branch RAS,
15, Acad. Vonsovsky street, Ekaterinburg, 620016, Russia.

The relevance of the research results from the discovery of new copper ore occurrences and the need to clarify the conditions of their formation in the Permian deposits of the Southern Pre-Urals against the background of poor lithological, mineralogical and geochemical studies of the latter. The genesis of copper sandstones of the Pre-Ural belt is still a matter of debate. The emergence of Cu mineralization is associated with both syn- and epigenetic processes, while infiltration or exfiltration mechanism of Cu-bearing fluid migration is assumed for the latter.

The work is aimed at the mineralogical and geochemical study of the ores of the Bazilevo copper occurrence and clarification of conditions of its formation.

Methods of research include field geological work, optical and scanning electron microscopy with X-ray spectral microanalysis, X-ray diffraction, X-ray fluorescence spectrometry, as well as mass spectrometric and atomic emission analysis with inductively coupled plasma.

Results. The mineralogical and geochemical characteristics of the ores of the Bazilevo copper occurrence in the Southern Pre-Urals were completed; the conditions for the formation of host rocks and ore bodies were studied. Their association with tree fossils with inheritance of general morphology is established. Ores (0.2–18.8 wt. % Cu, Ag up to 150 ppm, Pb up to 270 ppm) are localized in gray-colored sandy deposits of the Kazanian Stage, which are alluvial sediments. The area of ore occurrence is ≥ 1200 m², two ore-bearing beds were identified in the section. Three types of ore bodies were identified according to their internal structure. The main ore minerals are hydrocarbonates (azurite, malachite) and Cu sulfides (chalcocite, bornite, chalcopyrite, etc.). On the whole, the mineralogical and geochemical features of ores are consistent with the polygenic hydrogenic-sedimentary model of their formation with the participation of biogenic processes. The underlying terrigenous rocks (especially red-colored ones) served as the source of ore elements, and the ascending migration of mineral-forming fluids occurred along faults.

Key words:

Southern Pre-Urals, Kazanian Stage, copper sandstones, mineralized trees, mineralogy, geochemistry

The research was supported by the grant of the president of the Russian Federation no. MK-857.2021.1.5. Field studies and a part of analytical works were carried out with the support of the State task of IG, UFRC RAS (no. 0246-2019-0080) and the grant RB NOTs-GMU-2021. Analytical researches, including scanning microscopy and ICP MS were carried out in CFC «Geoanalitik» UB RAS within the subjects no. AAAA-A18-118053090045-8 and no. AAAA-A18-118053090045-8 of the State task of IGG UB RAS. Re-equipment and complex development of CFC «Geoanalitik» IGG UB RAS are financially supported by the grant of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, agreement no. 075-15-2021-680.

The authors thank R.M. Rakhimov for assistance in field studies.

REFERENCES

- Gablina I.F., Malinovskii Yu.M. Periodicity of copper accumulation in the Earth's sedimentary shell. *Lithology and Mineral Resources*, 2008, vol. 43, no. 2, pp. 136–153.
- Volkov A.V., Novikov I.A., Razumovsky A.A., Murashov K.Y., Sidorova N.V. Geochemical features and formation conditions of the cupriferous sandstones of the Orenburg Pre-Urals. *Lithosphere (Russia)*, 2018, no. 4, pp. 593–606. In Rus.
- Abramov B.N. Features of the distribution of precious metals in copper sandstones of the Kodar-Udokan ore region. *Lithosphere (Russia)*, 2006, no. 4, pp. 168–174. In Rus.
- Efremov I.A. Mestonakhozhdeniya permskikh nazemnykh pozvonochnykh v medistykh peschanikakh yugo-zapadnogo Priuralya [Localities of Permian terrestrial vertebrates in copper sandstones of the southwestern Pre-Urals]. *Bulletin of AS USSR. VII series. Department of Mathematical and Natural Sciences*, 1931, vol. 5, pp. 691–704.
- Gomankov A.V. Khvoynye iz permskikh otlozheniy Kargalinskikh rudnikov [Conifers from the Permian deposits of the Kargaly mines (Southern Pre-Urals)]. *Paleobotanika*, 2010, vol. 1, pp. 5–21.
- Salikhov D.N., Maslennikov V.V., Seravkin I.B., Belikova G.I., Galiullin B.G., Nikonov V.N. *Poleznye iskopaemye Respubliki Bashkortostan (rudy medi, tsinka, svintsa)* [Mineral resources of the Republic of Bashkortostan (copper, zinc, lead ores)]. Ufa, Gilem Publ., 2010. 376 p.
- Grek I.O., Dolotov Yu.A. Issledovaniya drevnikh rudnikov v Orenburgskoy oblasti i Bashkirii [Research of ancient mines in the

- Orenburg oblast and Bashkiria]. *Speleological Yearbook of ROSI*. Moscow, 2000. pp. 61–66.
8. Rakhimov I.R., Saveliev D.E., Kholodnov V.V., Zamyatin D.A. The unique Sabantuy chromite paleoplacer in the sedimentary cover of the Eastern European Platform. *Geology of Ore Deposits*, 2020, vol. 62, no. 6, pp. 542–546.
 9. Kharitonov T.V. Tri stadii obrazovaniya medistykh peschanikov Permskogo kraya: teoreticheskie rassuzhdeniya i poiskovye vyvody [Three stages of the formation of cuprous sandstones of the Perm Territory: theoretical reasoning and prospecting conclusions]. *Problemy mineralogii, petrografii i metallogenii. Nauchnye chteniya pamyati P.N. Chirvinskogo* [Problems of mineralogy, petrography and metallogeny. Scientific readings in memory of P.N. Chirvinskiy]. Perm, PSNIU, 2019. Vol. 22, pp. 263–272.
 10. Lurie A.M. *Genesis medistykh peschanikov i slantsev* [Genesis of cuprous sandstones and schists]. Moscow, Nauka Publ., 1988. 183 p.
 11. Desouky H.A.E., Muchez P., Tyler R. The sandstone-hosted stratiform copper mineralization at Mwitapile and its relation to the mineralization at Lufukwe, Lufilian foreland, Democratic Republic of Congo. *Ore Geology Reviews*, 2008, vol. 34, Iss. 4, pp. 561–579.
 12. Azizi H., Hosseinzadeh M.R., Moayyed M., Siahchesm K. Geology and geochemistry of the sediment-hosted stratabound red bed-type Cu-Pb (Zn-Ag) mineralization in the Dozkand-Moshampa Area, NW Zanjan, Iran. *Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie*, 2018, vol. 195, no. 2, pp. 123–143.
 13. Huang J., Ren T., Zou H. Genesis of Xinzhai sandstone-type copper deposit in Northern Laos: geological and geochemical evidences. *Journal of Earth Science*, 2019, vol. 30, no. 1, pp. 95–108.
 14. Subías I.F., Mateo E., García-Veigas J. A model for the diagenetic formation of sandstone-hosted copper deposits in Tertiary sedimentary rocks, Aragón (NE Spain): S/C ratios and sulphur isotope systematics. *Ore Geology Reviews*, 2003, vol. 23, no. 1–2, pp. 55–70.
 15. Kojima S., Trista-Aguilera D., Hayashi K.-i. Copper deposits based on geochemical studies of North Chilean deposits. Genetic aspects of the Manto-type. *Resource Geology*, 2009, vol. 59, pp. 87–98.
 16. Turikeshv G.T.-G., Danukalova G.A., Kutushev Sh.I.-B. *Yuzhnoe Preduralye: geografiya, geologiya, tektonika i geomorfologiya* [Southern Pre-Urals: geography, geology, tectonics and geomorphology]. Moscow, «Infra-M» Press, 2016. 260 p.
 17. Sinityn I.I., Sinityna G.I. *Obiyasnitelnaya zapiska k geologicheskoy karte SSSR masshtaba 1:200000, list № 40-XXVI* [Explanatory note to geological map of USSR scale 1:200000, sheet № 40-XXVI]. Moscow, Ministerstvo geologii, BTGU Publ., 1965. Vol. 1. 170 sh. Inv. no. 7150.
 18. Rakhimov I.R., Pushkarev E.V., Gottman I.A. Chromite paleoplacer in the Permian sediments at the East Edge of the East European Platform: composition and potential sources. *Minerals*, 2021, vol. 11, no. 7:691.
 19. Shutov V.D. Klassifikatsiya peschanikov [Classification of sandstones]. *Lithology and Mineral Resources*, 1967, no. 5, pp. 86–102.
 20. Puchkov V.N. *Paleogeodinamika Yuzhnogo i Srednego Urala* [Paleogeodynamics of the Southern and Middle Urals]. Ufa, Gilem Publ., 2000. 146 p.
 21. Maslov A.V., Mizens G.A., Badida L.V., Krupenin M.T., Vovna G.M., Kiselev V.I., Ronkin Yu.L. *Litogeokhimiya terrigenykh assotsiatsiy yuzhnykh vpadin Preduralskogo progiba* [Lithochemistry of terrigenous associations of the southern depressions of the Ural Foredeep]. Yekaterinburg, IGG UB RAS Publ., 2015. 308 p.
 22. Botvinkina L.N. *Sloistost osadochnykh porod* [Layering of sedimentary rocks]. Moscow, AS USSR Press, 1962. 542 p.
 23. Cherdantseva D.A., Kravchenko G.G., Krasnoshchekova L.A. The Yakovlevskaya suite oil-bearing sandstone formation conditions in the Lodochnoe oil field. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 10, pp. 115–127. In Rus.
 24. Telnova O.P., Shumilov I.K. Middle–Upper Devonian Terrigenous rocks of the Tsil'ma River basin and their palynological characteristics. *Stratigraphy and Geological Correlation*, 2019, vol. 27, pp. 27–50.
 25. Yan Y., Xia B., Lin X.J. Geochemistry of the sedimentary rocks from the Nanxiong Basin, South China and implications for provenance, paleoenvironment and paleoclimate at the K/T boundary. *Sedimentary Geology*, 2007, vol. 197, pp. 127–140.
 26. Gao G., Titi A., Yang S.R. Geochemistry and depositional environment of fresh lacustrine source rock: a case study from the Triassic Bajiantan Formation shales in Junggar Basin, northwest China. *Organic Geochemistry*, 2017, vol. 113, pp. 75–89.
 27. Cai G.Q., Guo F., Liu X.T. Carbon and oxygen isotope characteristics and palaeoenvironmental implications of lacustrine carbonate rocks from the Shahejie formation in the Dongying Sag. *Earth and Environment*, 2009, vol. 37, pp. 347–354.
 28. Wang A.H., Wang Z.H., Liu J. K., Xu N. C., Li H. L. The Sr/Ba ratio response to salinity in clastic sediments of the Yangtze River Delta. *Chemical Geology*, 2021, vol. 559, 119923.
 29. Jones B., Manning D.A.C. Comparison of geochemical indexes used for the interpretation of palaeoredox conditions in ancient mudstones. *Chemical Geology*, 1994, vol. 111, pp. 111–129.
 30. Tribouillard N., Algeo T.J., Lyons T. Trace metals as paleoredox and paleoproductivity proxies: an update. *Chemical Geology*, 2006, vol. 232, pp. 12–32.
 31. Naugolnykh S.V. Rastitelny mir permskogo perioda: Priurale [Plant World of Permian Period: Cis-Urals]. *Trudy Geologicheskogo instituta* [Geological Institute Proc.]. Moscow, GEOS Publ., 2016. Vol. 612, 336 p.
 32. *Copper deposits in sedimentary and volcanogenic rocks*. Eds. E.B. Tourtelot, J.D. Vine. Washington, U.S. Dept. of the Interior, Geological Survey, 1976. 44 p.
 33. Khasanov R.R., Gainov R.R., Varlamova E.S., Islamov A.F. Mechanisms of replacement of plant residues by copper sulfides in Permian sediments of the Vyatka-Kama copper-bearing belt. *Uchenye zapiski Kazanskogo gosudarstvennogo universiteta. Estestvennye nauki*, 2009, vol. 151, no. 4, pp. 162–169. In Rus.
 34. Briggs D.E.G., Raiswell R., Bottrell S.H., Hatfield D., Bartels C. Controls on the pyritization of exceptionally preserved fossils: An analysis of the Lower Devonian Hünshück Slate of Germany. *American Journal of Science*, 1996, vol. 296, pp. 633–663.
 35. Rudnitskiy V.F. *Osnovy ucheniya o poleznykh iskopaemykh* [Fundamentals of the doctrine of minerals]. 3rd ed. Yekaterinburg, USGU Press, 2015. 245 p.
 36. Kontar E.S. *Geologo-promyshlennye tipy mestorozhdeniy na Urale (geologicheskie usloviya razmeshcheniya, istoriya formirovaniya, perspektivy)* [Geological and industrial types of Cu, Zn, Pb deposits in the Urals (geological conditions of placement, history of formation, prospects)]. Yekaterinburg, Uralnedra Publ., 2013. 199 p.
 37. Kun L., Ruidong Y., Wenyong Ch., Rui L., Ping T. Trace element and REE geochemistry of the Zhewang gold deposit, southeastern Guizhou Province, China. *Chinese Journal of Geochemistry*, 2014, vol. 33, pp. 109–118.
 38. Oszczepalski S., Chmielewski A., Mikulski S.Z. Controls on the distribution of rare earth elements in the Kupferschiefer series of SW Poland. *Geological Quarterly*, 2016, vol. 60, no. 4, pp. 811–826.
 39. Lurye A.M., Gablina I.F. Ob istochnike medi pri formirovani mestorozhdeniy mansfeldskogo tipa v Zapadnom Priuralye [On the source of copper during the formation of deposits of the Mansfeld type in the Western Pre-Urals]. *Geochemistry International*, 1972, no. 1, pp. 75–88.
 40. Borg G., Piestrzyński A., Bachmann G.H., Puttman W., Walther S., Fiedler M. An overview of the European Kupferschiefer deposits. *Special publication: Society of Economic Geologists (U.S.)*, 2012, vol. 16, pp. 455–486.

Received: 29 September 2021.

Information about the authors

Ildar R. Rakhimov, Cand. Sc., senior researcher, Institute of Geology, Ufa Federal Research Center RAS.

Sergey V. Michurin, Cand. Sc., leading researcher, Institute of Geology, Ufa Federal Research Center RAS.

Anna G. Sultanova, junior researcher, Institute of Geology, Ufa Federal Research Center RAS.

Daria V. Kiseleva, Cand. Sc., senior researcher, A.N. Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry Ural Branch RAS.

Alsu M. Karamova, Cand. Sc., senior researcher, Institute of Geology, Ufa Federal Research Center RAS.

УДК 622.24

ИССЛЕДОВАНИЕ КАЧЕСТВА ВСКРЫТИЯ ПРОДУКТИВНЫХ ПЛАСТОВ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ РАЗЛИЧНЫМИ ТИПАМИ БИОПОЛИМЕРНЫХ БУРОВЫХ РАСТВОРОВ

Захаров Алексей Сергеевич¹,
asz23@tpu.ru

Минаев Константин Мадестович¹,
minaevkm@tpu.ru

Пестерев Алексей Викторович¹,
pesterev@tpu.ru

Боев Артем Сергеевич¹,
asboev@tpu.ru

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

Актуальность исследования обусловлена необходимостью совершенствования существующих рецептур буровых растворов на водной основе, предназначенных для первичного вскрытия продуктивных горизонтов месторождений Западной Сибири. Использование таких буровых растворов для первичного вскрытия нефтяных пластов приводит к безвозвратному снижению проектного дебита скважины. Применение операций по интенсификации притока (гидроразрыва пласта) не всегда возможно в связи с наличием сложной геологической структуры залегающих продуктивных горизонтов (нефтяные пласты малой мощности, близость водоносных пластов). Для объективной оценки воздействия промывочных жидкостей на фильтрационно-емкостные свойства коллектора необходимым является проведение лабораторных испытаний, моделирующих пластовые условия, на керне с выявлением причин снижения проницаемости.

Цель: оценка влияния различных рецептур промывочных жидкостей на водной основе на фильтрационно-емкостные свойства продуктивных коллекторов.

Объекты: керновый материал – мелко- и среднезернистый однородный серый песчаник с признаками углеводородов, отобранный на месторождениях Западной Сибири; буровые растворы первичного вскрытия на водной основе.

Методы: изучение степени влияния различными буровыми растворами первичного вскрытия на фильтрационно-емкостные свойства продуктивного коллектора; оценка значений коэффициентов восстановления проницаемости керна в термобарических условиях, максимально приближенных к пластовым.

Результаты. Проведена оценка влияния различных рецептур промывочных жидкостей первичного вскрытия на изменение фильтрационно-емкостных свойств керна материала месторождений Западной Сибири; выявлены причины снижения коэффициента восстановления проницаемости; проведен ряд исследований по оценке реологических и технологических параметров буровых растворов.

Ключевые слова:

Первичное вскрытие пласта, коэффициент восстановления, буровые растворы, керн, нефтяная скважина.

Введение

На данный момент большинство эксплуатационных нефтедобывающих скважин Западной Сибири вступают в позднюю стадию разработки. Для сохранения уровня добычи недропользователи вынуждены приступать к освоению месторождений, которые характеризуются низкими фильтрационно-емкостными свойствами (ФЕС) продуктивного коллектора. В связи с этим необходимо уделять особое внимание качеству бурового раствора (БР) для вскрытия продуктивного горизонта с целью сохранения естественных фильтрационно-емкостных свойств призабойной зоны пласта (ПЗП) [1].

В настоящее время буровой раствор, целью применения которого является качественное вскрытие продуктивных горизонтов, представляет собой сложную поликомпонентную систему с уникальными свойствами, позволяющими применять такие системы в сложных горно-геологических условиях, в том числе при бурении протяженных горизонтальных участков скважины [2, 3]. Наибольшее применение при бу-

рении наклонно-направленных и горизонтальных участков скважин, а также при вскрытии продуктивных пластов на нефтяных месторождениях находят безглинистые системы буровых растворов на водной основе [4–7]. Однако применение растворов первичного вскрытия, дисперсионной средой которых является подготовленная вода, может приводить к нарушению гидродинамической связи нефтяного пласта со скважиной в результате:

- засорения твердой дисперсной фазой бурового раствора порового пространства коллектора;
- повышения водонасыщенности в ПЗП при фильтрации дисперсионной среды бурового раствора;
- набухания диспергирующих глин в составе вмещающих пород;
- образования нерастворимых осадков при взаимодействии пластовых флюидов с фильтратом бурового раствора, образование водонефтяных эмульсий.

Влияние данных факторов при первичном вскрытии необратимо снижает нефтяной дебит разрабатываемого объекта [8–10]. Однако если освоение сква-

жин заканчивается креплением эксплуатационной колонны с последующей перфорацией или проведением работ по интенсификации притока (например, гидро-разрыв пласта), выбор типа бурового раствора для первичного вскрытия не носит принципиальный характер. В этом случае чаще всего применяют безглинистые полимеркарбонатные растворы, имеющие в своем составе ксантановую смолу, обеспечивающую необходимый реологический профиль течения буровых растворов первичного вскрытия, а также комплекс модифицированных и синтетических полимерных реагентов для контроля фильтрации и инкапсулирования выбуренного шлама [11]. Используемые в таких растворах полимерные реагенты устойчивы к деструкции в пластовых условиях и могут необратимо засорять ПЗП. Однако проведение ГРП или применение других способов интенсификации может снизить негативное влияние загрязнителей.

При строительстве скважин с горизонтальным участком, в котором обсадная колонна заканчивается нецементируемым хвостовиком, применяются биополимерные буровые растворы на водной основе (БПРВ) с биоразлагаемыми компонентами и низким содержанием твердой фазы [12–14]. Тем не менее применяемые в настоящее время БР не обеспечивают в полной мере сохранение проницаемости ПЗП.

Объектом исследований в настоящей работе выбрано месторождение Западной Сибири. Нефте-содержащие породы залегают преимущественно в горизонтах верхней (Ю1 и Ю2), средней (Ю3 и Ю4) и нижней (Ю5 и Ю6) юры Васюганской свиты, представленных песчано-алевритовыми коллекторами.

Целью настоящей работы является оценка эффективности применения БР различной рецептуры на водной основе и их влияние на ФЕС коллектора.

Для исследования были выбраны следующие БР: ингибированный полимеркарбонатный (ИПК, inhibited polymer carbonate – IPC), биополимерный ингибированный (БИ, biopolymer inhibited – BI), биополимерный ингибированный с сульфированным асфальтом (БИА, biopolymer inhibited sulfonated asphalt – BIA). Состав модельных буровых растворов сформирован согласно проектной документации на строительство скважин (табл. 1).

Таблица 1. Рецептуры буровых растворов первичного вскрытия

Table 1. Drilling fluids for primary opening

Компонент бурового раствора Component of drilling fluid	ИПК/IPC БИ/BI БИА/ВИА		
	Концентрация Concentration, %		
Каустическая сода/Soda ash	0,05	0,05	0,05
Хлорид калия/KCl	24	24	24
Камедь ксантановая/XC polymer	0,45	0,40	0,40
Полиакрилат натрия Sodium polyacrylate	0,6	–	–
Крахмал/Starch	–	1	1
Понижитель трения/Grase	0,5	–	–
Инкапсулятор/Encapsulator	0,03	–	–
Карбонат кальция Calcium carbonate	3	5	5
Сульфированный асфальт Sulfated asphalt	–	–	1

Исследование биополимерного раствора с добавкой сульфированного асфальта обусловлено работами [15, 16], в которых показано, что использование асфальта в составе промывочной жидкости позволяет эффективно сохранить коллекторские свойства продуктивного пласта на уровне, сопоставимом с результатами применения растворов на углеводородной основе. Однако анализ промысловых данных показывает, что введение данных компонентов в состав буровых растворов усложняет вывод скважины на запланированный дебит. Поэтому для оценки эффективности применения асфальтов в составе буровых растворов первичного вскрытия проведено сравнительное исследование исходного биополимерного раствора и с добавкой сульфированного асфальта.

Ряд выбранных для исследования БР дополнен модифицированным биополимерным раствором (БИМ), разработанным в Научно-образовательном центре нефтегазовой химии и технологии Инженерной школы природных ресурсов ТПУ. Особенностью данного бурового раствора является способность формировать на стенке скважины фильтрационную корку, препятствующую фильтрации водной фазы бурового раствора, но в то же время при вызове притока обеспечивающую высокую фазовую проницаемость по нефти, что повышает скорость вывода скважины на режимные параметры и минимизирует затраты на ее освоение [17].

Технологические параметры бурового раствора

Исследование технологических параметров БР проводилось согласно стандартам API 13B-1 (ГОСТ 33213-2014) на оборудовании производства OFI Testing Equipment (OFITE). Реологические параметры БР получены с использованием ротационного вискозиметра, модель 900. Для измерения статического показателя фильтрации при стандартных условиях применялся фильтр-пресс низкого давления и температуры (low temperature low pressure (LTLP)), для получения данных при пластовой температуре – фильтр-пресс (high temperature high pressure (HTHP)). Исследование набухаемости ядерного материала проводили на тестере линейного набухания. Межфазное натяжение между фильтратом бурового раствора и пластовой нефтью измерялось на тензиометре KRUSS GmbH. Все рецептуры исследуемых буровых растворов максимально унифицировали по плотности, pH и показателю фильтрации при стандартных условиях. Технологические и фильтрационные свойства буровых растворов представлены в табл. 2.

Минимальная фильтрация при повышенной температуре наблюдается для бурового раствора с добавлением сульфированного асфальта, что можно объяснить размягчением органического коагулянта в данных условиях. Уплотнение фильтрационной корки связано с уменьшением количества пор и трещин, обеспечивающих прохождение фильтрата бурового раствора.

Реологические свойства исследуемых буровых растворов, представленные на рис. 1, имеют близкие значения пластической вязкости и динамического напря-

жения сдвига как при стандартных условиях, так и при пластовой температуре. Статическое напряжение сдвига (СНС) определяет способность удержания шлама и кольматанта во взвешенном состоянии после остановки циркуляции, а вязкость при низкой скорости сдвига (ВНСС) – очистку ствола скважины и транспортировку твёрдой фазы в условиях низких скоростей течения, реализуемых при бурении горизонтальных и наклонно направленных скважин.

Таблица 2. Основные технологические и фильтрационные параметры буровых растворов первичного вскрытия пластов

Table 2. Main technological and filtration parameters of the drilling fluids for primary formation penetration

Буровой раствор Drilling fluid	Условная вязкость, с Conditional viscosity, c	Плотность, г/см ³ Density, g/ml	pH, ед./un	Толщина корки, мм Mud cake thickness, mm	Межфазное напряжение, мН/м Interfacial tension, mN/m	Показатель фильтрации API, см ³ Filtration rate API, ml	
						25 °С	90 °С
						ИПК/ЛРС	68
БИ/В1	56	1,16	9,5	<1	6,21	5,2	13,0
БИА/В1А	83	1,16	9,5	<1	6,37	5,6	11,6
БИМ/В1М	64	1,16	9,4	<1	6,01	6,0	15,6

Анализ результатов показал, что параметры СНС и ВНСС при повышении температуры (рис. 1, с) для всех типов буровых растворов значительно снижаются, однако при этом системы ИПК и БИМ обеспечивают максимальное сохранение СНС (40–50 % от значений при 25 °С) и ВНСС, что является положительным качеством данных систем БР.

Фильтрационные исследования

Образцы керна подготавливались в соответствии с ГОСТ 26450.0-85. КERN от остатков углеводородов очищался толуолом. Затем образцы сушились в вакуумном термощкафу при температуре 105 °С до постоянного веса. Далее образцы насыщались пластовой водой в сатураторе с последующим заданием остаточной водонасыщенности на центрифуге в пересчете на давление вытеснения 1 МПа. Образцы керна с остаточной водонасыщенностью помещались в керосин, где они хранились до проведения фильтрационных испытаний. Петрофизические характеристики коллекции керна представлены в табл. 3.

Таблица 3. Основные петрофизические характеристики образцов керна

Table 3. Basic petrophysical characteristics of core samples

Буровой раствор/ номер образца керна Drilling fluid/core sample number	Длина Length	Диаметр Diameter	$k_{пр\ газ} \cdot 10^{-3}$, мкм ² $k_{perm\ gas} \cdot 10^{-3}$, μm ²	φ	K_v K_w	$V_{пор}$, мл V_{por} , ml
	см/cm					
ИПК/27430	3,28	2,99	17,5	17,0	29,4	3,84
БИ/27426	3,31	2,99	20,5	17,2	28,7	3,93
БИА/27412	3,16	2,99	23,0	17,2	28,8	3,74
БИМ/27385	3,29	3,00	16,0	16,9	28,7	3,86

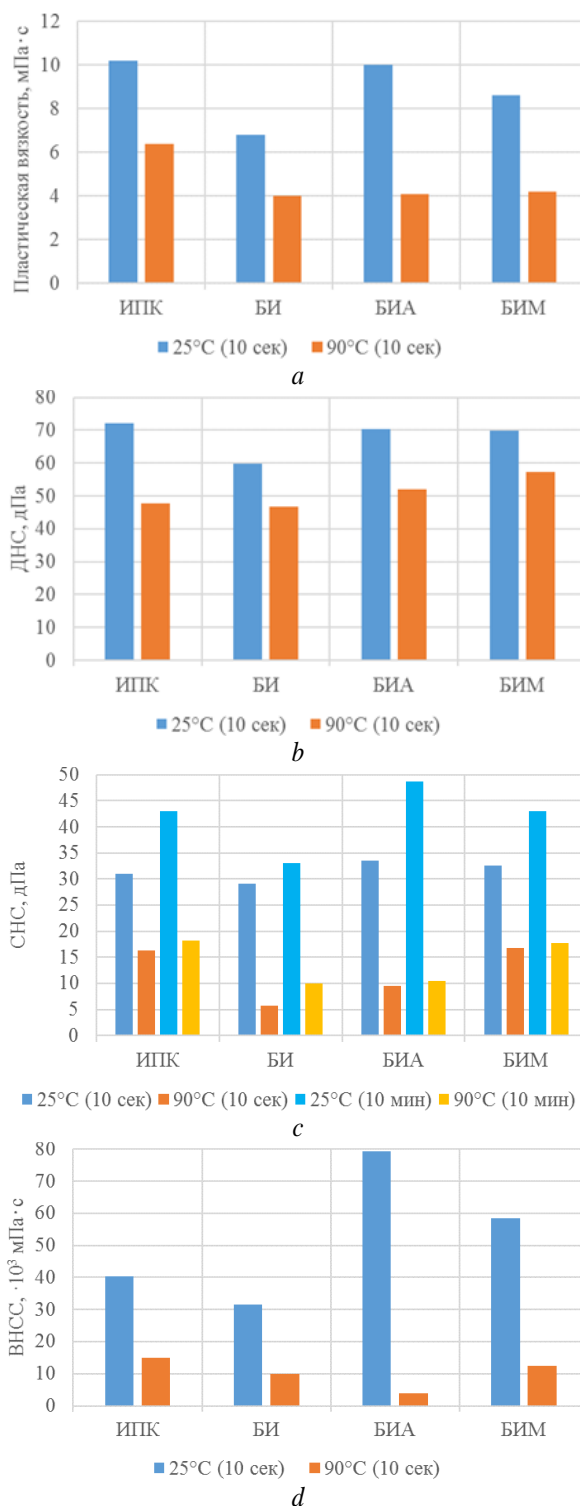


Рис. 1. Вязкость и напряжение сдвига БР: а) пластическая вязкость (ПВ); б) динамическое напряжение сдвига (ДНС); в) СНС за 10 с/10 мин; д) ВНСС

Fig. 1. Viscosity and shear stress of drilling fluid: а) plastic viscosity; б) yield point; в) gel strength 10s/10 min; д) low shear viscosity

Фильтрационные эксперименты проводились в условиях, моделирующих термобарические объекта разработки, на фильтрационной установке типа УИПК. Дизайн фильтрационного эксперимента

включает в себя несколько этапов. Нефтенасыщенная модель пласта выдерживалась в термобарических условиях не менее 16 часов для восстановления смачиваемости породы. Через образец керн прокачивали нефть на трех расходах до стабилизации перепада давления на каждом режиме. Зависимость перепада давления на образце от расхода аппроксимировали линейной функцией, и по закону Дарси рассчитывали эффективную проницаемость по нефти до воздействия бурового раствора. Вскрытие продуктивного пласта моделировали в два этапа. Вдоль выходного (относительно движения нефти) торца образца прокачивали буровой раствор на расходе 5 мл/мин, намыывая фильтрационную корку. На втором этапе моделировали репрессию на пласт, прокачивая буровой раствор в направлении, противоположном движению нефти (из скважины в пласт), на постоянном расходе 0,1 мл/мин до достижения перепада давления на образце 30 атм. После насос переводился в режим поддержания давления, и перепад на образце удерживался не менее 16 часов.

На следующем этапе определяли давление отрыва корки бурового раствора от стенки скважины. На расходе 0,01 мл/мин прокачивали нефть в прямом направлении (из пласта в скважину) до перегиба профиля перепада давления на образце. Максимальное значение перепада давления принималось за минимальное давление, необходимое для начала движения флюида в поровом пространстве.

Освоение скважины моделировалось в режиме поддержания перепада давления на образце. Первый перепад составлял 0,05 МПа на образец, что соответствует градиентам давления, развиваемым в ПЗП объекта разработки при освоении скважины [18]. Нефть прокачивали до стабилизации расхода. Далее каждый последующий перепад на образце удваивали, тем самым моделируя форсированные отборы жидкости. Для каждого режима рассчитывалась эффективная проницаемость по нефти после воздействия бурового раствора. Коэффициент восстановления проницаемости определяли как отношение проницаемости по нефти после бурового раствора к проницаемости до вскрытия пласта.

Таблица 4. Проницаемость по нефти и давление отрыва корки бурового раствора в фильтрационных испытаниях

Table 4. Oil permeability and mud-cake breakout pressure in filtration tests

Буровой раствор/ номер образца керна Drilling fluid/core sample number	$k_{пр\ нефть, до}$ 10^{-3} мкм^2 $k_{perm\ oil\ before}$ $10^{-3} \text{ } \mu\text{m}^2$	$k_{пр\ нефть\ после}$ 10^{-3} мкм^2 $k_{perm\ oil\ after}$ $10^{-3} \text{ } \mu\text{m}^2$			Градиент давления отрыва корки БР, МПа/м DF breakout pressure gradient, MPa/m
		$dp=0,05$	$dp=0,10$	$dp=0,20$	
ИПК (ИРС)/27430	12,12	0,51	1,01	2,26	3,99
БИ (ВИ)/27426	19,06	1,41	2,41	4,10	2,87
БИА (ВИА)/27412	20,42	0,85	1,58	2,78	4,75
БИМ (ВИМ)/27385	11,96	0,99	1,99	3,95	3,04

Для всех буровых растворов установлены низкие значения эффективной проницаемости по нефти после воздействия БР (табл. 4). Это связано с негативными процессами, протекающими в ПЗП, указанными выше. Для ранжирования вклада каждого фактора в снижение проницаемости проведен ряд дополнительных экспериментов. Следует отметить, что введение в состав БР сульфированного асфальта привело к повышению минимального градиента давления, при котором начинается движение флюидов в ПЗП, что связано с адгезией асфальтенов на стенках пор.

Несовместимость фильтрата бурового раствора с пластовыми флюидами

Ухудшение коллекторских свойств пласта может происходить в результате проникновения фильтрата промывочной жидкости в ПЗП с образованием нерастворимых осадков и эмульсий [19]. Поэтому была проведена серия экспериментов на совместимость фильтратов исследуемых БР с пластовой водой и нефтью. Анализ полученных результатов (табл. 5) показал, что флюиды совместимы при комнатной и пластовой температурах, и данный фактор не является основной причиной снижения эффективной проницаемости по нефти.

Таблица 5. Совместимость фильтрата БР с горными флюидами

Table 5. Compatibility of DF filtrate with fluids

Буровой раствор Drilling fluid	Фильтрат БР + пластовая нефть 25/90 °С Filtrate DF + oil 25/90 °С	Фильтрат БР + пластовая вода 25/90 °С Filtrate DF + water 25/90 °С
ИПК/ИРС	П/П Т/Т	П/П Т/Т
БИ/ВИ	П/П Т/Т	П/П Т/Т
БИА/ВИА	П/П Т/Т	П/П Т/Т
БИМ/ВИМ	П/П Т/Т	П/П Т/Т

Примечание: П – раствор остается прозрачным, без образования осадка/эмульсии.

Note: T – the solution remains clear, no sediment/emulsion formation.

Набухание глинистой фракции керна

При бурении скважины фильтрат промывочной жидкости под действием репрессии проникает в продуктивную толщу коллектора, пептизируя глинистые частички, находящиеся в порах. Последние, в свою очередь, увеличиваясь в размерах, плотно закупоривают поровое пространство, тем самым безвозвратно снижая продуктивный потенциал пласта-коллектора [20].

Исследования ингибирующих свойств рассматриваемых БР были проведены на цилиндрах, сформированных из дезинтегрированного керна. Предварительно керн измельчался в керамической ступке, просеивался через набор сит для отделения фракции 1 мм. Полученные навески высушивали в сушильном шкафу при температуре 105 °С до постоянной массы. Формование цилиндров проводилось на гидравличе-

ском компакторе ОФИТЕ. Результаты исследования представлены на рис. 2.

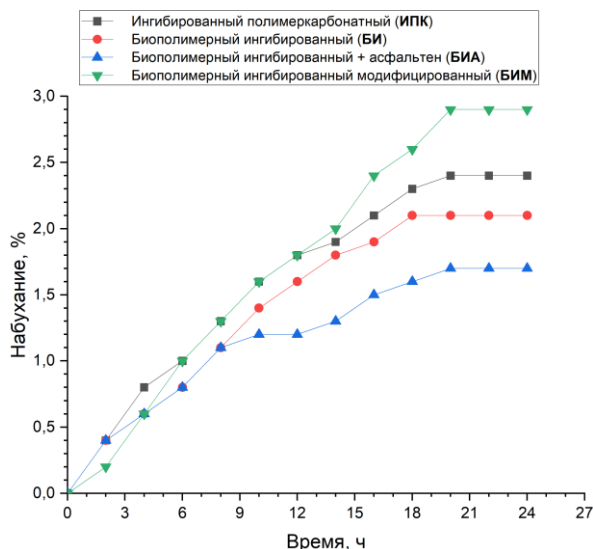


Рис. 2. Степень набухания кернового материала
 Fig 2. Swelling rate of core material

В течение 20 часов наблюдается монотонный рост объема испытуемых образцов, не превышающий 5%. С увеличением времени выдержки образцов наблюдается стабилизация кривых набухания (выход на плато), что обусловлено либо незначительным количеством глин в керне, либо выраженными ингибирующими свойствами исследуемых буровых растворов. Таким образом, набухание глинистой фракции не влияет на снижение проницаемости по нефти.

Засорение порового пространства коллектора твердой фазой бурового раствора

Влияние твердой фазы на засорение порового пространства коллектора можно оценить по результатам исследований, полученных при разработке БР БИМ. Фильтрационные испытания проводились на фильтр-прессе при комнатной и пластовой температурах. На первом этапе буровой раствор фильтровался через бумажный фильтр для создания фильтрационной корки. На втором этапе пластовую нефть фильтровали через получившуюся корку при тех же условиях, имитируя приток в скважину.

Система БР БИМ специально сконструирована для формирования на стенке скважины фильтрационной корки, проницаемой для углеводородов. Представленные в табл. 6 результаты демонстрируют, что стандартные системы БР (ИПК и БИ) не пропускают нефть как при нормальной, так и повышенной температуре, в то время как фильтрационная корка БР БИМ при температуре 90 °С обеспечивает свободное прохождение углеводородов.

Поскольку применение БР БИМ в фильтрационном эксперименте на керне также не привело к получению удовлетворительного коэффициента восстановления ($\beta < 0,7$), можно косвенно полагать, что засорение порового пространства не является основной причиной снижения проницаемости по нефти.

Таблица 6. Влияние фильтрационной корки на фильтрацию нефти

Table 6. Filter cake effect on oil filtration

Буровой раствор Drilling fluid	Фильтрация БР в «прямом» направлении «Forward» filtration of drilling fluid	Фильтрация флюида в «обратном» направлении «Opposite» filtration of mud	cm ³ /cm ³	
			25 °C	90 °C
			ИПК/IPC	8,3
БИ/BI	5,2	0,4	13,0	2,0
БИА/BIA	5,6	0,6	11,6	2,8
БИМ/BIM	6,0	12,0	15,6	194,4

Образование в призабойной зоне пласта области повышенной водонасыщенности

Для месторождений, характеризующихся гидрофильным характером смачиваемости продуктивных пластов, при проникновении фильтрата БР в ПЗП увеличивается текущая водонасыщенность, тем самым формируется эффект «водной блокады» в виде рыхлосвязанной воды за счет капиллярных и поверхностных сил. Согласно работам [21, 22], рыхлосвязанная вода располагается в виде многослойных пленок, покрывающих стенки фильтрующих пор и прочносвязанную воду, а нефть, как не смачивающая фаза, движется по центру фильтрующих пор. В процессе капиллярной пропитки нефть также оттесняется из мелких и средних пор в более крупные. В работах [23–25] механизм снижения проницаемости ПЗП описывается уменьшением эффективной пористости.

Для проверки фактора водной блокады после фильтрационных испытаний определяли конечную водонасыщенность образцов керна на аппарате Дина-Старка (табл. 7). Текущая водонасыщенность выросла на 10–12 % при кратном снижении проницаемости для всех рассматриваемых БР.

Таблица 7. Водонасыщенность образцов керна после фильтрационных испытаний

Table 7. Water saturation of core samples after filtration tests

Буровой раствор/номер образца керна Drilling fluid/core sample number	$K_{вв}/K_{wf}$, %
ИПК (IPC)/27430	39,1
БИ (BI)/27426	37,0
БИА (BIA)/27412	40,1
БИМ (BIM)/27385	38,9

На рис. 3 представлена зависимость коэффициента восстановления проницаемости β от относительного прироста водонасыщенности δ_v образца керна после фильтрационных испытаний. Наблюдается устойчивый тренд к снижению β с ростом относительной водонасыщенности для всех БР за исключением БР БИМ. Как функциональную зависимость, построенный тренд можно рассматривать только для режима фильтрации $dp=0,20$ МПа. Для двух других режимов

(0,05 и 0,10 МПа) тренды следует рассматривать как качественные кривые, описывающие тенденцию, т. к. на этих режимах не определялась текущая водонасыщенность.

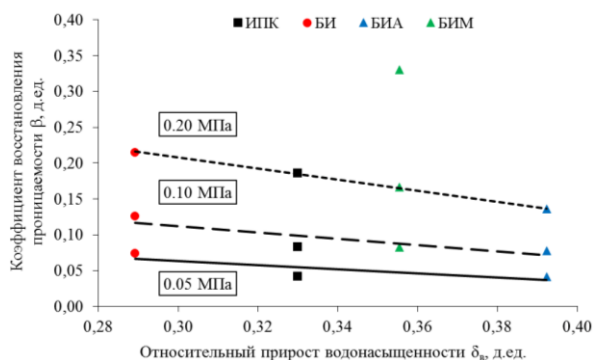


Рис. 3. Зависимость коэффициента восстановления проницаемости от относительного прироста водонасыщенности образца ядра

Fig. 3. Dependence of the permeability recovery factor on the relative increase in water saturation of the core sample

Повышение градиента давления в ПЗП приводит к выносу рыхлосвязанной воды из фильтрующих пор, а также к вовлечению в фильтрацию средних и мелких пор за счет превышения напорных сил над капиллярными. Однако применение форсированных отборов на скважине может не дать таких результатов, как в лабораторном эксперименте, из-за подтягивания конуса подошвенной воды. Поэтому при оценке эффективности БР, как основной рассматривается только коэффициент восстановления проницаемости, достигнутый при перепаде 0,05 МПа. При этом перепаде давления для всей линейки БР β не превысил 0,1. Таким образом, основной причиной снижения коэффициента восстановления

проницаемости по нефти является повышение текущей водонасыщенности в ПЗП.

Заключение

1. Для всех рассмотренных модельных композиций буровых растворов, применяемых и перспективных к применению на месторождениях Западной Сибири, определены низкие коэффициенты восстановления проницаемости.
2. Применение асфальтенов в составе биополимерных буровых растворов неэффективно для повышения коэффициента восстановления проницаемости.
3. Наибольший коэффициент восстановления проницаемости наблюдается при применении модифицированного биополимерного раствора, разработанного в Научно-образовательном центре нефтегазовой химии и технологии Инженерной школы природных ресурсов Томского политехнического университета.
4. Набухание глин в керновом материале и несовместимость фильтрата бурового раствора с пластовыми флюидами не являются значимыми факторами снижения коэффициента восстановления проницаемости.
5. Доказано, что основной причиной низких значений проницаемости по нефти является повышение водонасыщенности в призабойной зоне пласта. Вероятно, водная блокада является общим фактором падения проницаемости для гидрофильных низкопроницаемых коллекторов. Снижения водонасыщенности в призабойной зоне можно достичь введением в состав бурового раствора на водной основе поверхностно-активных веществ, регулирующих смачиваемость породы и снижающих межфазное натяжение на границе фильтрата бурового раствора с нефтью.
9. Investigation of the effects of sample handling procedures on references shale properties, Montreal / H.M.R. Santos, A. Diek, J.C. Roegiers, S.A.B. da Fontoura // Proc. of the 2nd North American Rock Mechanics Symposium. – Montreal, 1996. – V. 1. – P. 951–958.
10. Уляшева Н.М., Дуркин В.В., Михеев М.А. Кольматация призабойной зоны пласта технологическими жидкостями при строительстве скважин // Булатовские чтения. – Краснодар: ИД «Юг», 2021. – № 1. – С. 398–400.
11. Дедусенко Г.Я., Иванников В.И., Липкес М.И. Буровые растворы с малым содержанием твердой фазы. – М.: Изд-во «Недра», 1985. – 160 с.
12. Высокоингибирующий экологически безопасный буровой раствор для бурения горизонтальных скважин / О.А. Лушпеева, Г.Б. Проводников, И.В. Лодина, Л.П. Вахрушев, В.П. Полищученко // Бурение скважин. – 2007. – № 9. – С. 46–49.
13. Milas M., Rinando M. Conformational investigation of the bacterial polysaccharide xantan // Ibid. – 1979. – № 1. – P. 189–196.
14. Carboxymethylhydroxyethyl cellylose in drilling worker and cplomesion fluids: Patent. USA № 4239629, CO9 K7/02; Publ. 16.02.1980.
15. Чеславский Я.В. Совершенствование технологии вскрытия терригенных коллекторов горизонтальными скважинами с применением биополимерных буровых растворов: дис. ... канд. техн. наук. – Ухта, 2012. – 125 с.
16. Термостойкий биополимерный буровой раствор: пат. Рос Федерация, № 2711222, заявл. 15.11.18; опубл. 15.11.20. – Бюл. № 2. – 8 с.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Технология бурения нефтяных и газовых скважин / В.П. Овчинников, Ф.А. Агзамов, Т.О. Акбулатов, Р.Х. Санников. – Тюмень: ТИУ, 2017. – 560 с.
2. Глазко В.И. Использование раствора FLO PRO NT для первичного вскрытия продуктивного пласта наклонно-направленной с горизонтальным окончанием нефтяной добывающей скважины // Опыт, актуальные проблемы и перспективы развития нефтегазового комплекса. – Тюмень: ТИУ, 2018. – С. 39–41.
3. Blok L. New mud systems gels fild trial // Oil and Gas. – 1982. – № 9. – V. 80. – P. 79–82.
4. Мильвович Р.А. Применение биополимерного бурового раствора при первичном вскрытии продуктивного горизонта // Ломоносовские научные чтения студентов, аспирантов и молодых ученых. – Архангельск: САФУ, 2019. – С. 267–270.
5. Курбанов Х.Н. Буровые растворы для сохранения фильтрационно-емкостных свойств коллектора при первичном вскрытии пласта // Инженер-нефтяник. – 2016. – № 3. – С. 18–22.
6. Enright D.P., Dye B.M. New fluid sistem substitutes for oil-based fluids // World Oil. – 1991. – № 3. – P. 92–95.
7. Nance W.B. How to select oil mud applications // Petroleum engineering Jawaharlal Nehru Technological University Hyderabad. – January 1984. – V. 56. – P. 30–38.
8. Corlev W.T., Patlon G.T. Clear fluids they are not always notdamaging // World Oil. – 1984. – V. 199. – № 6. – P. 66–69.

17. Захаров А.С., Абраменкова Е.А., Минаев К.М. Совершенствование рецептур блок-пачек, применяемых при глушении продуктивных пластов // Нефтепромысловая химия: VII Международная научно-практическая конференция. – М.: НИ РГУ, 2020. – С. 19–21.
18. Подход к оценке влияния жидкостей глушения на водной основе с добавками ПАВ на керн низкопроницаемых терригенных коллекторов на примере Лугинецкого НГКМ / В.В. Евсеев, О.В. Гаврилюк, О.В. Глазков, Д.Н. Мезенцев, А.А. Терентьев, О.Т. Мусин // Практические аспекты нефтепромысловой химии: II Всероссийская научно-практическая конференция. – Уфа, 2012. – С. 35–37.
19. Кошелев В.Н. Научные и методические основы разработки и реализации технологии качественного вскрытия продуктивных пластов в различных геолого-технических условиях: дис. ... канд. техн. наук. – Краснодар, 2004. – 402 с.
20. Darley H.C.H., Gray G.R. Composition and properties of drilling and completion fluids. 5th ed. – Houston; London; Paris; Zurich; Tokyo: Gulf Publ. Company, 1979. – 643 p.
21. Демахин С.А., Демахин А.Г., Губанов В.Б. Изучение влияния гидрофобизирующих составов на водонасыщенность и проницаемость призабойной зоны нефтяного пласта // Нефтепромысловое дело. – 2009. – № 6. – С. 25–28.
22. Penny G.S., Pursley J.Th. Field studies of drilling and completion fluids to minimize damage and enhance gas production in unconventional reservoirs // Society of Petroleum Engineers. – 2007. – № 06. – P. 32–38.
23. Никитин В.И., Милькова С.Ю., Мясников Д.Ю. Определение остаточной насыщенности фильтратом буровой промывочной жидкости призабойной зоны пласта // Булатовские чтения. – Краснодар: ИД «Юг», 2020. – Т. 3. – С. 261–263.
24. Никитин В.И., Нечаева О.А., Мозговой Г.С. Анализ результатов эксперимента по определению насыщенности фильтратом промывочной жидкости образца ядерного материала // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2021. – № 2. – С. 11–13.
25. Optimizing filtrate design to minimize in-situ and wellbore damage to water-wet reservoirs during drill-in / Ch. Dalmazzone, A. Audibert, L. Quintero, T. Jones, C. Dewattines, M. Janssen // Society of Petroleum Engineers. – 2004. – № 01 – P. 12–20.

Поступила 08.04.2022 г.

Информация об авторах

Захаров А.С., аспирант отделения нефтегазового дела Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Минаев К.М., кандидат химических наук, доцент отделения нефтегазового дела Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Пестерев А.В., кандидат физико-математических наук, инженер научно-образовательного центра «Нефтегазовой химии и технологии» Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Боев А.С., кандидат химических наук, доцент отделения нефтегазового дела Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 622.24

INFLUENCE OF THE COMPOSITION OF BIOPOLYMER DRILLING FLUIDS ON THE QUALITY OF EXPOSURE OF PRODUCTIVE LAYERS OF THE WESTERN SIBERIA

Alexey S. Zakharov¹,
asz23@tpu.ru

Konstantin M. Minaev¹,
minaevkm@tpu.ru

Alexey V. Pesterev¹,
pesterev@tpu.ru

Artem S. Boev¹,
asboev@tpu.ru

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

Relevance of the study is caused by the need to improve the existing formulations of water-based drilling fluids for the primary opening of the productive reservoir of the Western Siberia. The use of such drilling fluids for the initial opening of oil reservoirs leads to an irreversible decrease in the design flow rate of the well. Application of stimulation operations (hydraulic fracturing) is not possible due to the presence of a complex geological structure of productive horizons (oil reservoirs of low thickness, the proximity of bottom water). To assess the impact of flushing fluids on the reservoir properties, it is necessary to conduct laboratory tests simulating reservoir conditions on a core to identify the reasons for the decrease in permeability.

Purpose: to assess the effect of various formulations of water-based flushing fluids on the reservoir properties of productive reservoirs.

Objects: core material – fine- and medium-grained homogeneous gray sandstone with signs of hydrocarbons, water-based primary drilling fluids.

Methods: study of the degree of influence of various opening drilling fluids on the reservoir properties of a productive reservoir; assess of the values of the recovery factor of the core permeability in thermobaric conditions, as close as possible to the reservoir ones.

Results. The authors assessed the influence of flushing fluids of primary opening on the change in the filtration-capacity properties of the core material collected from the Western Siberia; determined the reasons for the decrease in the permeability recovery factor; carried out a number of studies to assess the rheological and technological parameters of drilling fluids.

Key words:

Primary opening of the reservoir, recovery factor, drilling fluid, core, oil well.

REFERENCES

- Ovchinnikov V.P., Agzamov F.A., Akbulatov T.O., Sannikov R.Kh. *Tekhnologiya bureniya neftyanykh i gazovykh skvazhin* [Oil and gas well drilling technology]. Tyumen, TIU Publ., 2017. 560 p.
- Glazko V.I. Ispolzovanie rastvora FLO PRO NT dlya pervichnogo vskrytiya produktivnogo plasta naklonno-napravlennoy s gorizontalmym okonchaniem neftyanoy dobyvayushchey skvazhiny [The use of FLO PRO NT solution for the primary opening of a productive formation of a deviated oil production well with a horizontal end]. *Opyt, aktualnye problemy i perspektivy razvitiya neftegazovogo kompleksa* [Experience, current problems and prospects for the development of the oil and gas complex]. Tyumen, TIU Publ., 2018. pp. 39–41.
- Blok L. New mud systems gels field trial. *Oil and Gas*, 1982, vol. 80, no. 9, pp. 79–82.
- Milvovich R.A. Primenenie biopolimernogo burovogo rastvora pri pervichnom vskrytii produktivnogo gorizonta [The use of biopolymer drilling mud during the initial opening of the productive horizon]. *Lomonosovskie nauchnye chteniya studentov, aspirantov i molodykh uchenykh* [Lomonosov scientific readings of students, graduate students and young scientists]. Arkhangel'sk, SAFU Publ., 2019. pp. 267–270.
- Kurbanov Kh.N. Burovye rastvory dlya sokhraneniya filtratsionno-emkostnykh svoystv kollektora pri pervichnom vskrytii plasta [Drilling fluids to preserve the reservoir properties of the reservoir during the initial opening of the reservoir]. *Inzhener-neftyanik*, 2016, no. 3, pp. 18–22.
- Enright D.P., Dye B.M. New fluid sistem substitutes for oil – based fluids. *World Oil*, 1991, no. 3, pp. 92–95.
- Nance W.B. How to select oil mud applications. *Petroleum engineering Jawaharlal Nehru Technological University Hyderabad*, 1984, vol. 56, no. 1, pp. 30–38.
- Corlev W.T., Patlon G.T. Clear fluids they are not always notdamaging. *World Oil*, 1984, vol. 199, no. 6, pp. 66–69.
- Santos H.M.R., Diek A., Roegiers J.C., Da Fontoura S.A.B. Investigation of the effects of sample handling procedures on references shale properties, Montreal. *Proceedings of the 2nd North American RockMechanics Symposium*. Montreal, 1996. Vol. 1, pp. 951–958.
- Ulyasheva N.M., Durkin V.V., Mikheyev M.A. Kolmatatsiya prizaboynoy zony plasta tekhnologicheskimi zhidkostyami pri stroitelstve skvazhin [Colmatation of bottomhole formation zone with process fluids during well construction]. *Bulatovskie chteniya* [Bulatov readings]. Krasnodar, Yug Publ. house, 2021. No 1, pp. 398–400.
- Dedusenko G.Ya., Ivannikov V.I., Lipkes M.I. *Burovye rastvory s malym sodержaniem tverdogo fazy* [Low solids drilling fluids]. Moscow, Nedra Publ., 1985. 160 p.
- Lushpeeva O.A., Provodnikov G.B., Lodina I.V., Vakhrushev L.P., Polishchuchenko V.P. Highly inhibiting environmentally friendly drilling fluid for drilling horizontal wells. *Drilling of the wells*, 2007, no. 9, pp. 46–49. In Rus.
- Milas M., Rinando M. Conformational investigation of the bacterial polysaccharide xantan. *Ibid.*, 1979, no. 1, pp. 189–196.
- Charles A. *Carboxymethylhydroxyethyl cellylose in drilling, worker and completion fluids*. Patent 4239629 USA, 1980.
- Cheslavsky Ya.V. *Sovershenstvovanie tekhnologii vskrytiya terrigenykh kollektorov gorizontalmymi skvazhinami s primeneniym biopolimernykh burovyykh rastvorov*. Dis. Kand. nauk [Improvement of the technology of drilling terrigenous reservoirs with horizontal wells using biopolymer drilling fluids. Cand. Diss.]. Ukhta, 2012. 125 p.
- Ishbaev G.G. *Termostoykiy biopolimerny burovoy rastvor* [Heat-resistant biopolymer drilling mud]. Patent RF, no. 2711222, 2020.
- Zakharov A.S., Abramenkova E.A., Minaev K.M. Sovershenstvovanie retseptur blok-pachek, primenyaemykh pri glushenii produk-

- ativnykh plastov [Improving the formulations of block-packs used for killing productive formations]. *VII Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya. Neftepromyslovaya khimiya* [VII International Scientific and Practical Conference. Oilfield Chemistry]. Moscow, NI RGU Publ., 2020. pp. 19–21.
18. Evseev V.V., Gavrilyuk O.V., Glazkov O.V., Mezentsev D.N., Terentev A.A., Musin O.T. Podkhod k otsenke vliyaniya zhidkostey glusheniya na vodnoy osnove s dobavkami PAV na kern nizkopronitsaemykh terrigennykh kollektorov na primere Luginetskogo NGKM [An approach to assessing the impact of water-based killing fluids with surfactant additives on the core of low-permeability terrigenous reservoirs using the example of the Luginetskoe oil and gas condensate field]. *II Vserossiyskaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya. Prakticheskie aspekty neftepromyslovoy khimii* [II All-Russian Scientific and Practical Conference. Practical Aspects of Oilfield Chemistry]. Ufa, 2012. pp. 35–37.
 19. Koshelev V.N. *Nauchnye i metodicheskie osnovy razrabotki i realizatsii tekhnologii kachestvennogo vskrytiya produktivnykh plastov v razlichnykh geologo-tekhnicheskikh usloviyakh*. Dis. Kand. nauk [Scientific and methodological foundations for the development and implementation of technology for high-quality penetration of productive strata in various geological and technical conditions. Cand. Diss.]. Krasnodar, 2004. 402 p.
 20. Darley H.C.H., Gray G.R. *Composition and properties of drilling and completion fluids*. 5th ed. Houston, London, Paris, Zurich, Tokyo, Gulf Publ. Company, 1979. 643 p.
 21. Demakhin S.A., Demakhin A.G., Gubanov V.B. Izuchenie vliyaniya gidrofobiziruyushchikh sostavov na vodonasyschennost i pronitsaemost prizaboynoy zony neftyanogo plasta [Study of the influence of hydrophobic compositions on water saturation and permeability of the bottomhole zone of an oil reservoir]. *Neftepromyslovoe delo*, 2009, no. 6, pp. 25–28.
 22. Penny G.S., Pursley J.Th. Field studies of drilling and completion fluids to minimize damage and enhance gas production in unconventional reservoirs. *Society of Petroleum Engineers*, 2007, no. 06, pp. 32–38.
 23. Nikitin V.I., Milkova S.Yu., Myasnikov D.Yu. Opredelenie ostatnochnoy nasyschennosti filtratom burovoy promyvochnoy zhidkosti prizaboynoy zony plasta [Determination of residual saturation by filtrate of drilling fluid in the bottomhole formation zone]. *Bulatovskie chteniya* [Bulatov readings]. Krasnodar, Yug Publ. house, 2020. pp. 261–263.
 24. Nikitin V.I., Nechaeva O.A., Mozgovoy G.S. Analysis of the results of the experiment to determine the saturation of the filtrate of the washing liquid of the core material sample. *Stroitelstvo neftyanykh i gazovykh skvazhin na sushe i na more*, 2021, no. 2, pp. 11–13. In Rus.
 25. Dalmazzone Ch., Audibert A., Quintero L., Jones T., Dewattines C., Janssen M. Optimizing filtrate design to minimize in-situ and wellbore damage to water-wet reservoirs during drill-in. *Society of Petroleum Engineers*, 2004, no. 01, pp. 12–20.

Received: 8 April 2022.

Information about the authors

Alexey S. Zakharov, postgraduate student, National Research Tomsk Polytechnic University.

Konstantin M. Minaev, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Alexey V. Pesterev, Cand. Sc., engineer, National Research Tomsk Polytechnic University.

Artem S. Boev, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 622.243.43

РАЗРАБОТКА РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО ОПТИМИЗАЦИИ КОНСТРУКЦИИ СНАРЯДА ДЛЯ ШАРОСТРУЙНОГО БУРЕНИЯ

Исаев Евгений Дмитриевич¹,
pelletdrilling@gmail.com

Ковалев Артем Владимирович¹,
arteka011287@mail.ru

Саруев Лев Алексеевич¹,
saruevla@tpu.ru

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

Актуальность. Несмотря на активное развитие возобновляемых источников энергии, ископаемое топливо все еще занимает лидирующую позицию среди известных энергоресурсов. При этом, согласно прогнозам, в ближайшие десятилетия Россия останется одним из их крупнейших мировых экспортеров. Поэтому в нашей стране все более остро стоит вопрос по сохранению объема добычи полезных ископаемых, что требует разведки новых месторождений, разработки новых решений, позволяющих осуществлять работы в сложных условиях. Одним из таких решений может стать шароструйное бурение. Над развитием шароструйного бурения работали ряд исследователей. Было предложено большое количество различных снарядов для шароструйного бурения. При этом до сих пор не существует конструкции, принятой за наиболее рациональную.

Цель: разработка рекомендаций к конструкции снаряда для шароструйного бурения, наиболее полно отвечающего требованиям геологоразведочных и горнодобывающих отраслей промышленности.

Объектом исследования является буровой снаряд для шароструйного бурения.

Методы: обзор литературных источников; систематизация классификационных признаков различных конструкций снарядов для шароструйного бурения; анализ известных конструкций согласно разработанной классификации.

Результаты. Установлено, что наибольшая механическая скорость бурения шароструйным способом будет достигаться при использовании снаряда, состоящего из одной камеры смешения цилиндрической формы. При этом подъем шаров выше впускных окон должен быть ограничен задерживающим устройством, а расстояние между снарядом и забоем необходимо поддерживать без использования элементов, контактирующих с забоем скважины. Предложена конструкция снаряда, удовлетворяющего перечисленным критериям.

Ключевые слова:

Шароструйное бурение, шароструйный снаряд, эжектор, струйный аппарат, ударное бурение.

Введение

За последние 10 лет интерес к шароструйному бурению существенно вырос. С 2011 г. опубликовано большое число статей и патентов, посвященных данному способу, в том числе и зарубежных авторов. Несмотря на возросший интерес, до сих пор четко не определена оптимальная конструкция снаряда для шароструйного бурения. Так, исследователями из Украины [1–4] предлагается конструкция, в основе которой лежит комбинирование шароструйного бурения с вращательным бурением и использованием гидравлического забойного двигателя для передачи вращения снаряду. Исследователи из Китая предлагают комбинировать механическое вращательное и ударное бурение. Разрушение периферийной части забоя осуществляется с использованием резцов типа PDC и ударным разрушением центральной части забоя металлическими сферами, выходящими из сопел насадок долота и циркулирующими с подъемом из скважины [5–14]. В конструкции, предложенной С.А. Заурбековым в Казахстане, шароструйное бурение комбинируется с вращательным, но механическим способом разрушается не периферийная, а центральная часть забоя [15]. Среди более ранних исследований, проводимых в США [16] и СССР [17], была принята конструкция с

одной камерой смешения цилиндрической формы, где забой разрушался под действием только ударов шаров. Помимо перечисленных решений, существует множество других запатентованных конструкций снарядов.

Несмотря на большой объем работы, проделанной различными исследователями, шароструйное бурение все еще полностью не исследовано, и все еще остаются нерешенными некоторые проблемы, препятствующие его внедрению. Требуется проведение дополнительных лабораторных исследований. Успешность и лабораторных, и стендовых испытаний, и последующего широкого промышленного внедрения напрямую будет зависеть от выбора исследуемой конструкции снаряда. При этом, как следует из анализа работ [1–31], единая конструкция снаряда, которую можно принять за наиболее рациональную, все еще не определена.

Цель: разработать рекомендации к конструкции снаряда для шароструйного бурения.

Для реализации поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

- осуществить обзор патентов и других литературных источников;
- выделить классификационные признаки в конструкциях снарядов;

- провести анализ по выделенным классификационным признакам;
- сформировать рекомендации к конструкции снаряда для шароструйного бурения;
- обосновать совместимость предложенных рекомендаций.

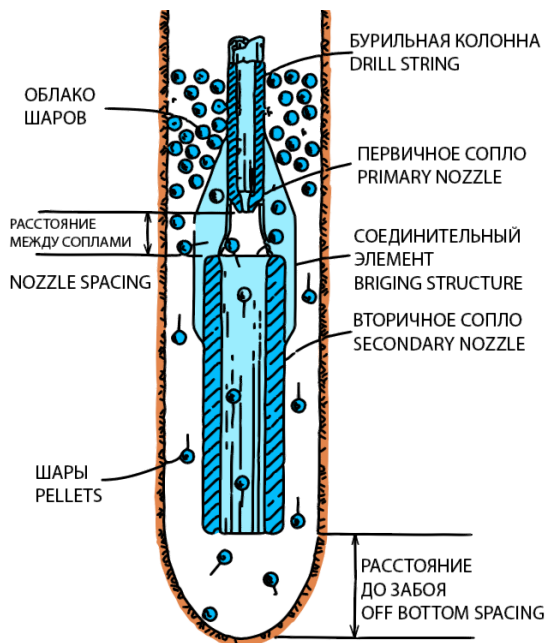


Рис. 1. Первая конструкция снаряда для шароструйного бурения, 1956 г., США

Fig. 1. First pellet impact drilling bit design, 1956, USA

Результаты и обсуждение

На рис. 1 представлена первая конструкция снаряда для шароструйного бурения, предложенная в США [16]. На ее примере рассмотрим, как происходит разрушение горной породы при шароструйном бурении.

По колонне буровых труб подается промывочная жидкость, которая истекает из сопла с высокой скоростью. Шары движутся в потоке промывочной жидкости и ускоряются под действием струи, проходя внутри вторичного сопла (камеры смешения). Вылетая, шары пролетают расстояние между снарядом и забоем скважины и ударяются о горную породу, разрушая ее. Далее шары поднимаются по затрубному пространству, формируя облако, и повторно поступают внутрь снаряда, проходя промежуток между первичным и вторичным соплами, увлекаемые струей жидкости, истекающей из сопла. Данный цикл многократно повторяется.

Перед проведением анализа необходимо определить, какие условия должны выполняться при бурении различными снарядами, чтобы бурение можно было отнести к шароструйному. Такие условия сформулированы на основании работ [16, 17]:

- разрушение горной породы происходит под действием ударов металлических шаров;
- шары ускоряются под действием струи жидкости или воздуха и не имеют постоянного контакта со снарядом;

- одни и те же шары циркулируют многократно, существенно не повреждаясь после единичных столкновений.

Исходя из перечисленных выше условий, в дальнейший обзор не включены способы бурения, в которых разрушение горной породы происходит исключительно в результате гидромониторного или абразивного воздействия, а также в результате ударного воздействия сферических тел, энергия которым передается непосредственными ударными механизмами.

Для разработки рекомендаций к конструкции снаряда для шароструйного бурения необходимо было выделить классификационные признаки, по которым можно разделить все известные снаряды. В результате проделанной работы рассмотрено большое число конструкций, в том числе приведенных в данной статье [18–31], анализ которых позволил выделить признаки, перечисленные ниже.

По способам повторной подачи шаров на забой:

- изменение направления движения шаров за счет снижения скорости восходящего потока и эффекта эжекции;
- изменение направления движения шаров за счет использования механического задерживающего устройства;
- прохождение шарами полного цикла циркуляции вместе с промывочной жидкостью;

По расположению сопел:

- одно вертикальное сопло (бурение без вращения снаряда);
- одно наклонное сопло (бурение с вращением снаряда);
- несколько вертикальных сопел (бурение без вращения или с вращением снаряда);
- несколько наклонных сопел (бурение с вращением снаряда);
- одно вертикальное сопло, смещенное относительно центра (бурение с вращением снаряда).

По наличию комбинирования с вращательным бурением:

- без комбинирования;
- с комбинированием, шароструйным способом разрушается центральная часть забоя;
- с комбинированием, шароструйным способом разрушается периферийная часть забоя.

По способу поддержания расстояния между снарядом и забоем:

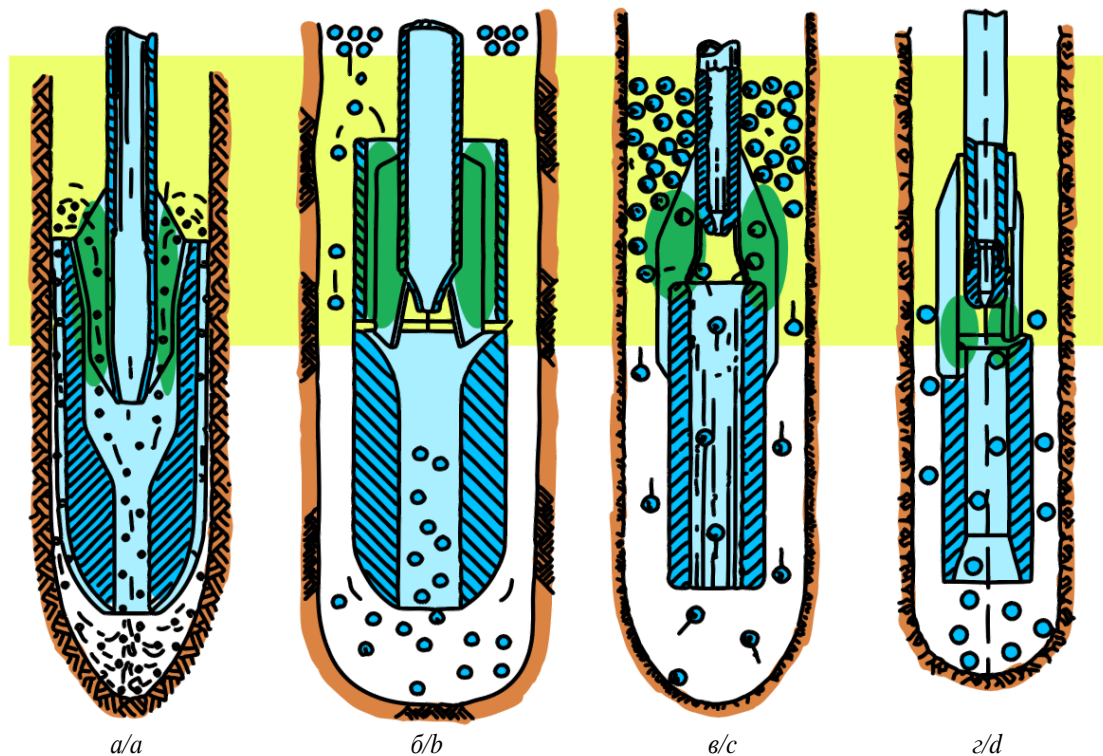
- с центрально расположенным опорным элементом (комбинирование с вращательным бурением и без комбинирования);
- с периферийно расположенным опорным элементом (комбинирование с вращательным бурением);
- с использованием электромагнитного расходомера в составе колонны;
- с использованием датчика расхода шаров;
- с периодической кратковременной разгрузкой снаряда на забой и подъемом до требуемой высоты.

Ниже проведен анализ каждого из перечисленных классификационных признаков.

Способы повторной подачи шаров. После удара о горную породу шары поднимаются по затрубному пространству вместе с частицами шлама. Необходимо изменить траекторию движения шаров и повторно направить их к забою скважины. Для решения этой задачи применяются различные технические средства.

Наиболее простым средством управления траекторией движения шаров является изменение скорости и направления потока промывочной жидкости, в которой они находятся. На рис. 2 изображены конструкции шароструйных снарядов, где управление потоком

достигается за счет изменения диаметра снаряда и эффекта эжекции. Шары, поднимаясь по затрубному пространству, достигают зоны, скорость восходящего потока в которой ниже из-за увеличения площади сечения кольцевого пространства (рис. 2, зона 1). При этом скорости восходящего потока становится недостаточно для выноса шаров, и происходит их скопление над зоной изменения диаметра снаряда. Из образовавшегося облака шары повторно попадают внутрь снаряда за счет эффекта эжекции, заключающейся в создании зоны низкого давления (рис. 2, зона 2) рядом с быстро истекающей из сопла жидкостью.



- 1 зона изменения скорости восходящего потока/zone where the speed of drilling mud return changes;
2 зона низкого давления/low pressure zone

Рис. 2. Снаряды с ограничением высоты поднятия шаров за счет эффекта эжекции: а) П.С. Уильямс, США; б) Г. Рамзи, США; в) Дж.Е. Экель, США; г) А.Б. Уваков, СССР

Fig. 2. Drilling bits with limited raising of pellets due to the ejection effect: а) P.S. Williams, USA; б) G.H. Ramsey, USA; в) J.E. Eckel, USA; г) A.B. Uvakov, USSR

Способ изменения направления движения шаров, представленный в схемах на рис. 2, имеет ряд недостатков:

- Над выпускными окнами формируется скопление шаров, препятствующих свободному подъему шлама.
- Повторно эжектируются не только шары, но и часть шлама. В процессе бурения это приведет к снижению эффективности бурения и дополнительному абразивному износу элементов.
- Существует вероятность самопроизвольного искривления скважин из-за отсутствия центрирующих элементов рядом с забоем.
- Необходимо обеспечить строго заданную производительность насосов, которую сложно определить и проконтролировать в производственных

условиях. При повышении производительности существует риск подъема шаров выше выпускных окон. При снижении производительности из-за падения коэффициента эжекции уменьшается расход шаров в единицу времени, что снижает эффективность бурения.

- Необходимо обеспечить строго заданные реологические свойства промывочной жидкости. При увеличении реологических параметров бурового раствора шары могут подниматься выше выпускных окон, а коэффициент эжекции может падать.

Другим способом изменения направления движения шаров является использование задерживающих элементов. Задерживающее устройство в конструкциях

снарядов, изображенных на рис. 3, выделено красным цветом. Оно располагается между шароструйным снарядом и стенками скважины и препятствует подъему

шаров выше определенной зоны. Задерживающее устройство частично перекрывает затрубное пространство, направляя шары внутрь камеры смешения.

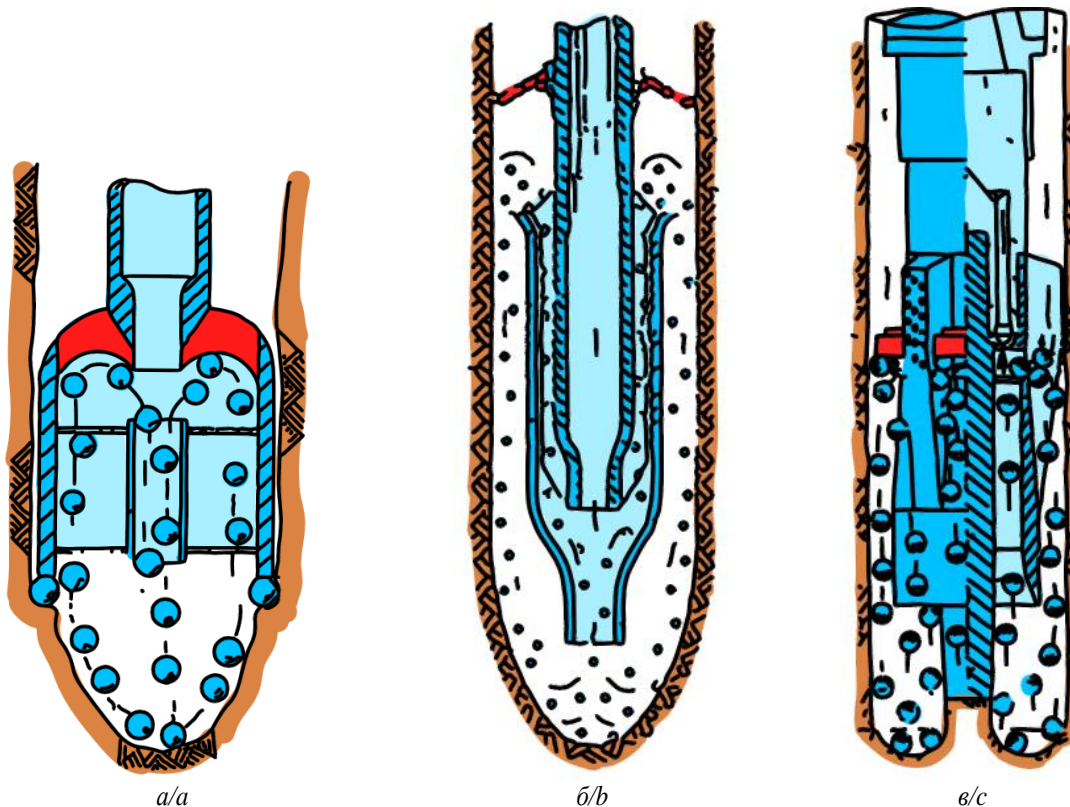


Рис. 3. Снаряды с ограничением высоты поднятия шаров за счет механического задерживающего устройства: а, б) Л.В. Леджервуд, США; в) С.А. Заурбеков, Казахстан

Fig. 3. Drilling bits with limited raising of pellets due to a mechanical arrester: a, b) L.W. Ledgerwood, USA; c) S.A. Zaurbekov, Kazakhstan

Применение задерживающего устройства позволяет решить некоторые проблемы:

- Шары не формируют скопления над впускными окнами и быстрее повторно попадают в камеру смешения, благодаря чему уменьшается переизмельчение шлама и абразивный износ снаряда.
- Снимается ограничение на производительность насосов и реологические свойства промывочной жидкости. При повышении производительности насоса шары не будут выноситься выше впускных окон.
- Обеспечивается дополнительное центрирование бурового снаряда в скважине.

Благодаря перечисленным выше преимуществам, можно предположить, что применение задерживающего устройства позволяет добиться большей скорости бурения и упростить контроль технологических параметров при бурении.

При этом конструкция задерживающего устройства должна быть тщательно продумана для минимизации вероятности возникновения осложнений. В процессе бурения возможны случаи осыпания горной породы со стенок скважины, что может нарушить свободное хождение снаряда. Также в процессе бурения будет происходить износ задерживающего

устройства в результате непосредственного контакта с шарами.

Известен еще один способ повторной подачи шаров, который заключается в том, что шары поднимаются на поверхность, отделяются от выбуренной породы и повторно опускаются по колонне бурильных труб, проходят через сопло [5–14]. Существенным ограничением при применении данной схемы бурения является максимальный возможный диаметр шаров, ограниченный диаметром сопла (в работах [15–17] установлено, что наибольшая скорость бурения достигается при максимально возможном диаметре шаров). Кроме того, необходимо решить ряд сложных задач для успешной реализации данного способа повторной подачи шаров: отделение шаров от выбуренной породы; предотвращение оседания шаров в емкостях на поверхности; подача шаров в скважину в обход буровых насосов.

Способы направления шаров на забой скважины. В основе большинства конструкций снаряда для шароструйного бурения лежит струйный аппарат, состоящий из сопла (первичного сопла) и камеры смешения (вторичного сопла). Сопло предназначено для ускорения струи жидкости, передающей энергию шарам; камера смешения предназначена для направле-

ния движения шаров к забою скважины. Данные элементы играют значительную роль в эффективности бурения, так как непосредственно влияют на скорость и траекторию движения шаров. При этом ключевыми факторами является их количество, расположение и размеры относительно диаметра скважины.

Наиболее подробно в литературе описаны конструкции с одним соплом и камерой смешения, ось которой совпадает с осью скважины. Снаряды с несоосным расположением камеры смешения, как с одним, так и с несколькими соплами, представлены на рис. 3.

На рис. 4, а изображен снаряд с одним соплом и камерой смешения, смещенными относительно центра оси скважины. Для разрушения горной породы по всему забою снаряд требуется вращать, подставляя под удар различные части забоя. У представленной конструкции сложно выделить явные преимущества. Особенностью можно считать подпружиненный элемент, выступающий в качестве контроля расстояния между снарядом и забоем. Предположительно, в реальных условиях бурения шары будут подниматься выше по затрубному пространству, так как отсут-

ствуют препятствующие этому факторы: изменение сечения снаряда или задерживающее устройство.

На рис. 4, б, в представлены конструкции снарядов с наклонным направлением сопла и камеры смешения. Элементы направлены таким образом, чтобы шары бомбардировали периферийную часть забоя. Главной решаемой задачей являлась разработка скважины по диаметру. Для формирования цилиндрической формы ствола скважины конструкции необходимо вращать, что можно назвать главным минусом. Вращение накладывает дополнительные требования к применяемому наземному узлу (станку для бурения), усложняется технология проведения работ, увеличивается риск возникновения аварий. При вращении неизбежно возрастет и износ снаряда.

На рис. 4, д представлен скважинный расширитель, имеющий несколько сопел и камер смешения, расположенных по периферийной части забоя. В процессе бурения скважины с большой долей вероятности шары попадут в начальный ствол меньшего диаметра (пилотный ствол), что приведет к прекращению бурения.

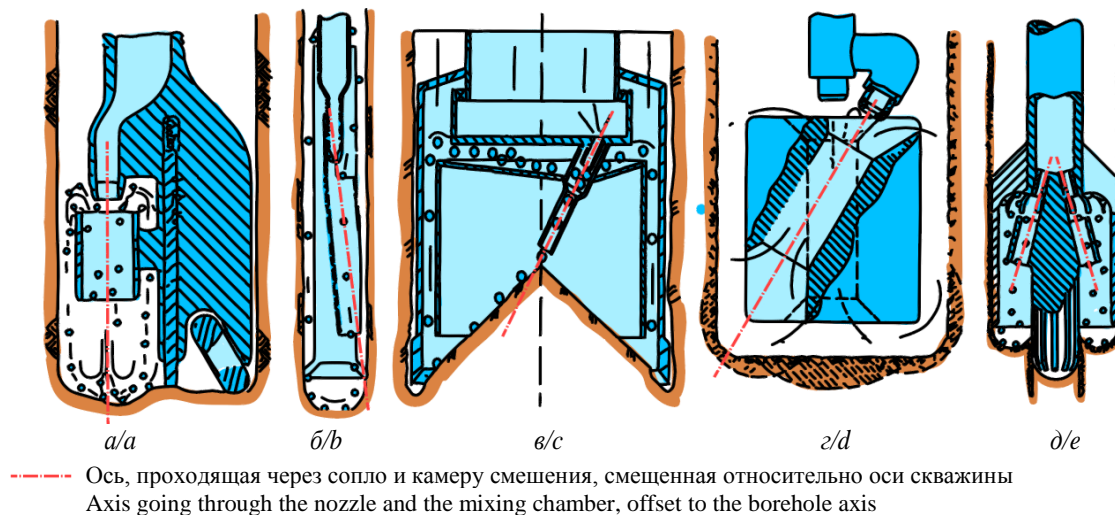


Рис. 4. Конструкции снарядов с несоосным расположением сопел: а) П. Уильямс, США; б) Дж. Ортлофф, США; в) Т.Н. Зубкова, Россия; г) В.В. Штрассер, СССР; д) М. Рот, США

Fig. 4. Designs of drilling bits with misaligned nozzles: а) P.S. Williams, USA; б) J.E. Ortloff, USA; в) T.N. Zubkova, Russia; д) V.V. Shtrasser, USSR; е) M. Roth, USA

Общим недостатком снарядов на рис. 4 является снижение максимального диаметра используемых шаров, по сравнению с конструкциями с одним соплом и камерой смешения, расположенными соосно со скважиной, что обусловлено конструктивными особенностями.

Использование нескольких сопел приводит к конструктивному усложнению снаряда. При прочих равных условиях при одной и той же производительности насоса снижается скорость истекающей струи на каждое из сопел. Увеличивается вероятность неравномерного разрушения забоя. В случае смещения снаряда в скважине относительно оси существует высокая вероятность изменения формы скважины из-за того, что шары будут поступать в каждую камеру смешения неравномерно.

Исходя из перечисленных факторов, наиболее эффективным можно считать бурение со снарядом, имеющим одну камеру смешения и одно сопло, расположенные соосно. Именно данные конструкции имели наибольшее практическое применение. Снаряды иных конструкций представлены только в патентах. Исключением является снаряд С.А. Заурбекова, изображенный на рис. 3, в. Данный снаряд будет дополнительно рассмотрен в следующих разделах.

Комбинирование ударного и вращательного бурения. Конструкции, в которых комбинируются два разных способа бурения, ударное и механическое вращательное, приведены на рис. 5. Элемент, осуществляющий разрушение под действием вращения и осевой нагрузки, выделен красным. Во всех приведенных на рисунке случаях под действием удара раз-

рушается центральная часть забоя. Конструкции, в которых ударным способом разрушается периферийная часть забоя, представлены на рис. 3, в; 4, в. Вращательным способом разрушение осуществляется с применением либо алмазного, либо твердосплавного вооружения, а также при помощи дроби.

Достоинством комбинированного способа бурения является решение проблем необходимости под-

держания расстояния до забоя и номинального диаметра ствола скважины. Важно отметить, что при этом теряются основные достоинства шароструйного бурения: мобильность, отсутствие необходимости во вращении снаряда, накладываются дополнительные требования к прочностным характеристикам бурильной колонны, возрастают требования к буровой установке.

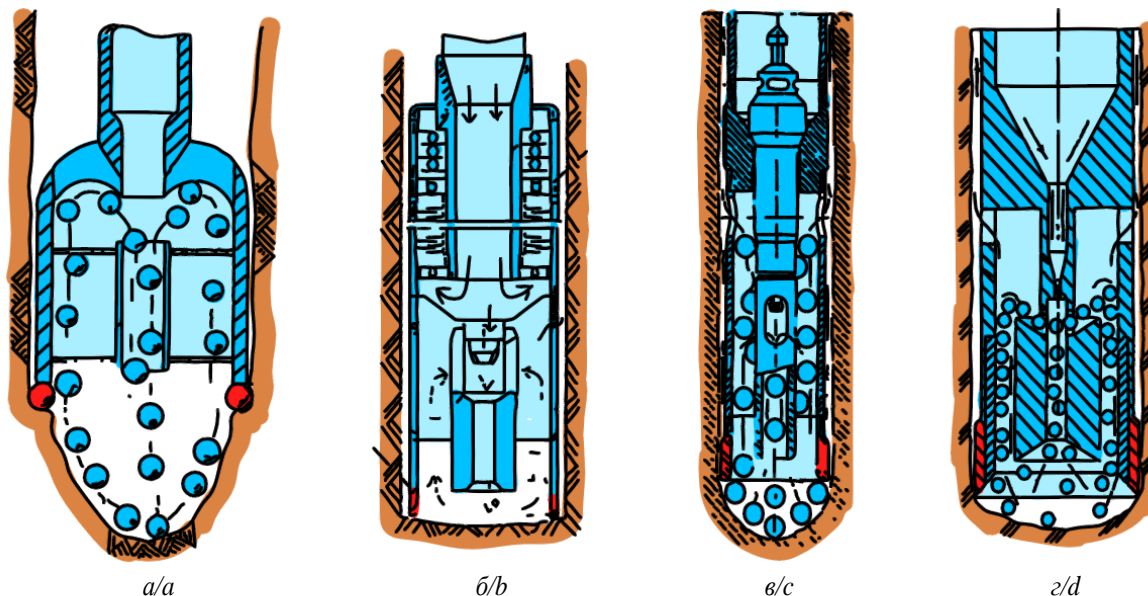


Рис. 5. Конструкции снарядов для комбинированного бурения: а) Л. Леджервуд, США; б) А.О. Игнатов, С.С. Вяткин, Украина; в) А.Б. Уваков, СССР; г) Т.Н. Зубкова, Россия

Fig. 5. Designs of drilling bits for combination drilling: а) L.W. Ledgerwood, USA; б) A.O. Ignatov, S.S. Vyatkin, Ukraine; в) A.B. Uvakov, USSR; г) T.N. Zubkova, Russia

Можно утверждать, что механической скорости бурения, получаемой при бурении комбинированным способом, можно добиться и при вращательном бурении сплошным забоем. Исключением можно считать конструкцию, изображенную на рис. 3, в. Данный снаряд в промышленных условиях показал более высокую эффективность бурения, чем при вращательном бурении с использованием шарошечных долот [15]. Это объясняется различным типом вооружения долот (при вращательном бурении использовались шарошечные долота, при комбинированном бурении центральная часть забоя разрушалась твердосплавными вооружением). При этом нет информации о продолжительности рейса бурения до износа вооружения, так как в работе отмечено, что фактором, ограничивающим продолжительность рейса бурения, являлся износ сопел.

Поддержание расстояния между снарядом и забоем. Особенностью шароструйного способа бурения является необходимость поддержания оптимального расстояния между снарядом и забоем.

Метод поддержания оптимального расстояния при помощи периодического опускания снаряда на забой (расхаживания) использовал А.Б. Уваков [17] в конструкции, представленной на рис. 2, г. Данный метод нельзя считать оптимальным, так как существует вероятность повреждения снаряда при чрезмерной разгрузке на забой.

Для снижения вероятности повреждения снаряда в другой конструкции, не получившей применения, предлагалось использовать подпружиненный узел, частично гасящий удар при разгрузке снаряда на забой (рис. 6, а). Решение существенно усложняет конструкцию снаряда, при этом подпружиненный узел располагается выше впускных окон, ребра которых являются наиболее слабым элементом, не выдерживающим высоких осевых нагрузок.

В конструкции, изображенной на рис. 6, б, имеется опорный элемент, касающийся забоя. При слишком большом расстоянии от снаряда до забоя проходное отверстие перекрывается, происходит прекращение циркуляции, сопровождаемое резким скачком давления на насосе. В этом случае требуется опустить снаряд ниже. Схему нельзя считать применимой в промышленных условиях. В процессе бурения опорный элемент будет подвержен многочисленным ударам шаров, что может привести к его повреждениям. Кроме того, данный элемент перекрывает сопло, что приведет к снижению скорости истечения струи промывочной жидкости. Также опорный элемент перекрывает центральную часть потока, где скорость истечения может быть потенциально максимальной, в результате чего существенно снизится скорость шаров и, соответственно, скорость бурения. Можно считать, что описанная проблема минимизирована в конструкции

С.А. Заурбекова (рис. 2, в), так как опорный элемент имеет большую устойчивость к ударам шаров за счет высокой металлоемкости, но этот же факт и препятствует разрушению центральной части забоя шарами.

Перечисленные два способа (подпружиненный элемент и наличие опоры) сочетает в себе конструкция П. Уильямса (рис. 4, а). Но применяемая там пружина, имея малый диаметр, не способна будет гасить сколь-либо существенные нагрузки.

Еще один способ поддержания расстояния – использование датчиков расхода шаров. Решение с электромагнитным датчиком расхода шаров изображено на рис. 5, в. Решение технически сложно реализуемо, так как, помимо размещения катушки электромагнитной индукции внутри стенки камеры смешения, необходимо обеспечить канал связи между датчиком и поверхностью. Такой канал связи сложно организовать через бурильные трубы.

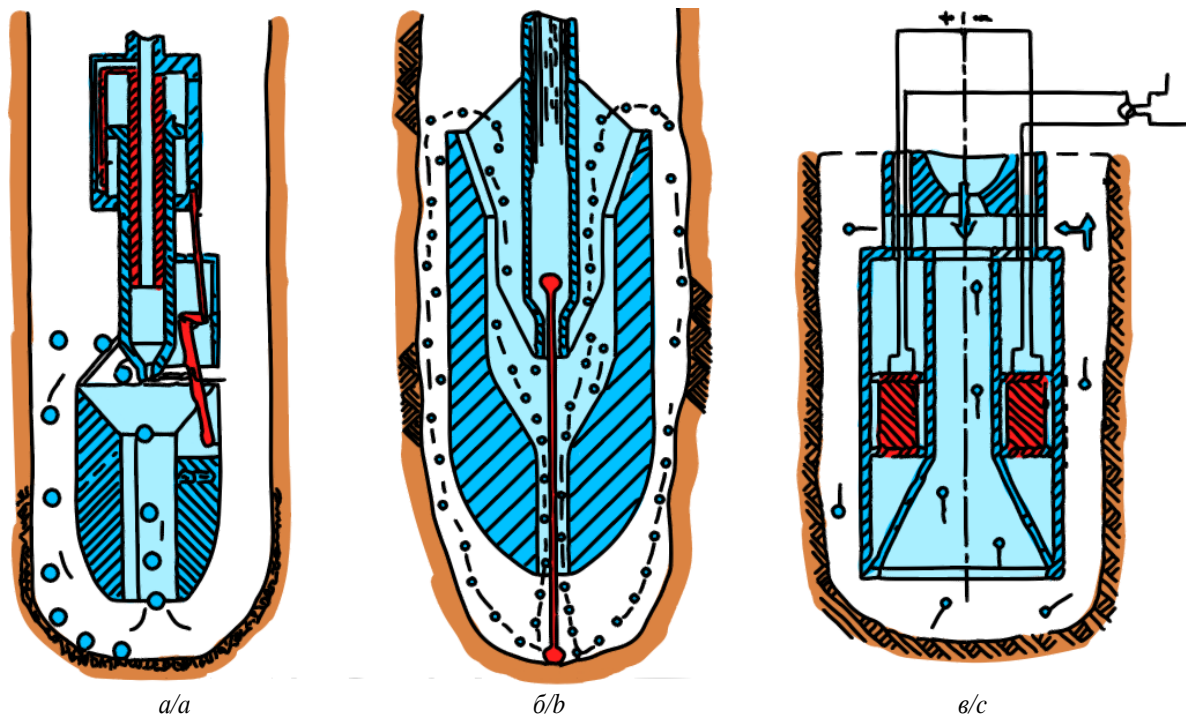


Рис. 6. Конструкции, решающие проблему поддержания расстояния между снарядом и забоем: а) Е.М. Макнатт, США; б) Л.В. Леджервуд, США; в) Л.С. Дербенев, СССР

Fig. 6. Designs of drilling bits that solve the problem of maintaining the distance between the drilling bit and the well bottom: а) E.M. McNatt, USA; б) L.W. Ledgerwood, USA; в) L.S. Derbenev, USSR

Разработанная конструкция снаряда. Проведенный анализ позволил выявить, что наибольшая механическая скорость бурения шароструйным способом будет достигаться при соблюдении критериев:

- Одна камера смешения цилиндрической формы и одно сопло, расположенные соосно со скважиной.
- Подъем шаров выше впускных окон должен быть ограничен задерживающим устройством.
- Отсутствует комбинирование с вращательным способом бурения.
- Расстояние между снарядом и забоем необходимо поддерживать без разгрузки снаряда на забой и без использования опорных элементов, перекрывающих часть забоя скважины и подвергаемых износу в процессе бурения.

Предлагаемая конструкция, совмещающая в себе перечисленные выше критерии, изображена на рис. 7 и состоит из одного сопла – 3 и одной камеры смешения – 4; имеется задерживающее устройство. Для поддержания постоянного расстояния между снарядом и забоем предлагается использовать датчик акустических колебаний, располагающийся на колонне

бурильных труб [17], совместно с блоками усиления и обработки сигнала.

Бурение осуществляется следующим образом. После подачи промывочной жидкости через сопло – 3 шары – 6 приводятся в движение циркуляцией промывочной жидкости. Поднимающиеся в затрубном пространстве шары – 6 ограничены наличием задерживающего устройства и под действием эффекта эжекции проходят через впускные окна внутрь камеры смешения – 4. Под действием струи жидкости шары ускоряются и ударяют о забой скважины, осуществляя разрушение горной породы. В процессе бурения часть шаров отскакивает от забоя и соударяется с буровым снарядом. Частоту ударов можно зафиксировать при помощи осциллографической приставки, соединенной с датчиком акустических колебаний, размещенным на колонне бурильных труб.

При углублении забоя происходит изменение частоты ударов шаров о забой скважины и стенки снаряда, что можно зафиксировать на осциллографической приставке. Для восстановления частоты ударов требуется переместить буровой снаряд ниже.

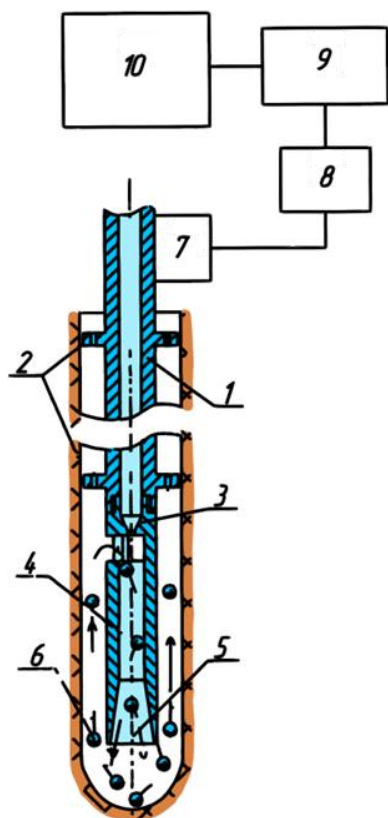


Рис. 7. Оптимальная конструкция снаряда: 1 – буровая колонна; 2 – центраторы; 3 – сопло; 4 – камера смешения; 5 – диффузор; 6 – шары; 7 – датчик акустических колебаний; 8 – усилитель сигнала; 9 – осциллографическая приставка; 10 – система управления

Fig. 7. Optimal design of a drilling bit: 1 – drill string; 2 – centralizers; 3 – nozzle; 4 – mixing chamber; 5 – diffuser; 6 – pellets; 7 – acoustic vibration gauge; 8 – signal amplifier; 9 – oscilloscope; 10 – control system

Разработанная схема с применением датчика акустических колебаний успешно прошла лабораторные

стендовые испытания [32] и запатентована как полезная модель [33].

Предложенная автором схема снаряда применялась при проведении лабораторных испытаний по определению оптимальных технологических режимов бурения и геометрических пропорций снаряда.

Заключение

В работе рассмотрено большое количество конструкций снарядов для шароструйного бурения. Выделены различные классификационные признаки, объединяющие данные конструкции. Проведен анализ каждого из признаков, что позволило сформулировать рекомендации по оптимизации конструкции снаряда для шароструйного бурения.

Согласно рекомендациям, снаряд должен состоять из одной камеры смешения цилиндрической формы и одного сопла, расположенных соосно со скважиной. При этом подъем шаров выше впускных окон должен быть ограничен задерживающим устройством, а расстояние между снарядом и забоем необходимо поддерживать без использования элементов, контактирующих с забоем скважины.

На основании сформированных рекомендаций предложена конструкция снаряда. Приведенная конструкция и технологическая схема запатентованы и прошли стендовые испытания.

Предложенная конструкция снаряда принята за основу для проведения дальнейших исследований. При применении данной конструкции можно добиться максимального баланса между механической скоростью бурения за счет оптимизации траектории движения шаров и возможностью использования шаров наибольшего диаметра.

Планируется в дальнейшей работе уделить дополнительное внимание оптимизации конструкции задерживающего устройства и отработке схемы для поддержания требуемого расстояния между забоем скважины и буровым снарядом при помощи датчика акустических колебаний.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ihnatov A. Analyzing mechanics of rock breaking under conditions of hydromechanical drilling // Mining of Mineral Deposits. – 2021. – V. 15. – Iss. 3. – P. 122–129.
2. Geological and mining-engineering peculiarities of implementation of hydromechanical drilling principles / A.O. Ihnatov, Ye.A. Koroviaka, J. Pinka, V.O. Rastsvietaiev, O.O. Dmytruk // Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. – 2021. – V. 1. – P. 11–18.
3. Development of the rational bottomhole assemblies of the directed well drilling / A. Ihnatov, Ye. Koroviaka, V. Rastsvietaiev, L. Tokar // Gas Hydrate Technologies: Global Trends, Challenges and Horizons. – 2020. – V. 230. – P. 1–14.
4. Кулеструминний пристрій для буріння свердловин: пат. Україна, 102708 №а201107452 МПК Е 21 В 7/18. Заявл. 14.06.2011; Опубл. 12.08.2013; Бюл. № 15.
5. Experiment of rock breaking by particle-jet coupling impact / Cheng Xiaoze, Ren Fushen, Fang Tiancheng, Chang Yulian // Acta Petrolei Sinica. – 2018. – V. 39. – № 2. – P. 232–239.
6. Particle jet impact deep-rock in rotary drilling: failure process and lab experiment / Tiancheng Fang, Fushen Ren, Baojin Wang, Jianxun Cheng, Hanxu Liu // PLoS ONE. – April 28, 2021. – P. 1–19.
7. Design and experimental investigation about a simulation device for particle impact rock breaking / Fushen Ren, Baojin Wang, Xiaoze Cheng, Suli Chen, Ruoxu Ma, Yang Li, Jianhua Liu // International Conference on Experimental Mechanics 2014. – Singapore, 2015. – V. 9302. – P. 1–10.
8. The effects of inclined particle water jet on rock failure mechanism: experimental and numerical study / Lei Li, Fangxiang Wang, Tianyang Li, Xiaodong Dai, Xueyang Xing, Xiancheng Yang // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2020. – V. 185. – P. 1–12.
9. Failure volume under particle water-jet impact in deep well drilling engineering: mathematical modeling and verification analysis / Fushen Ren, Tiancheng Fang, Xiaoze Cheng, Jianxun Cheng // Alexandria Engineering Journal. – 2020. – V. 60. – P. 1839–1849.
10. Stress modeling and simulation analysis of particle impact rock-breaking / Tiancheng Fang, Baojin Wang, Jianxun Cheng, Fushen Ren, Fushen Ren // 2020 7th International Forum on Electrical Engineering and Automation. – Hefei, China, 2020. – V. 1. – P. 4866–4881.
11. Fushen Ren, Tiancheng Fang, Xiaoze Cheng. Study on rock damage and failure depth under particle water-jet coupling impact // International Journal of Impact Engineering. – 2020. – V. 139. – P. 103504.

12. Fushen Ren, Tiancheng Fang, Xiaoze Cheng. Study on rock-breaking depth and damage area under particle jet impact // *Shock and Vibration*. – 2020. – V. 2020. – P. 1–12.
13. Fushen Rena, Tiancheng Fangb, Xiaoze Chengc. Theoretical modeling and experimental study of rock-breaking depth in particle jet impact drilling process // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2019. – V. 183. – P. 1–12.
14. Numerical simulation and experimental verification of the rock damage field under particle water jet impacting / Fangxiang Wang, Ruihe Wang, Weidong Zhou, Guichun Chen // *International Journal of Impact Engineering*. – 2017. – V. 102. – P. 169–179.
15. Заурбеков С.А. Повышение эффективности призабойных гидродинамических процессов при шароструйном бурении скважин: дис. ... канд. техн. наук. – Алматы, 1995. – 141 с.
16. Eckel I.E., Deily F.H., Ledgerwood L.W. Development and testing of jet pump pellet impact drill bits // *Transaction AIME*. – 1956. – V. 207. – P. 1–15.
17. Уваков А.Б. Шароструйное бурение. – М.: Недра, 1969. – 207 с.
18. Combination pellet impact drill and annulus cutting drill: Patent USA no. 2698736, cl. 255-61. Fil. 01.29.1952; Publ. 01.04.1955.
19. Шароструйный снаряд для бурения скважин: А.с. № 417599, Е 21 В 7/18. № 1451266; заявл. 15.06.1970; опубл. 28.02.1974.
20. Шароструйный снаряд для бурения скважин: пат. РФ № 2114274, Е 21 В 7/18. № 96123178/03; заявл. 05.12.1996; опубл. 27.06.1998.
21. Штрассер В.В. Исследование процессов разрушения горных пород ударами шаров (к теории шароструйного бурения): дис. ... канд. техн. наук. – Алма-Ата, 1966. – 217 с.
22. Устройство для шароструйного бурения скважин: пат. РФ № 2124620, Е 21 В 7/18. № 97100372/03; заявл. 14.01.1997; опубл. 10.01.1999.
23. Pellet impact drilling apparatus: Pat. USA No. 2868509, cl. 255-61. Fil. 06.07.1956; Publ. 01.13.1959.
24. Pellet impact drill bit with controlled pellet return: Pat. USA No. 2779571, cl. 255-61. Fil. 04.09.1954; Publ. 01.29.1957.
25. Combination of pellet impact drilling and rotary shot drilling: Pat. USA No. 2727727, cl. 255-61. Fil. 01.29.1952; Publ. 12.20.1955.
26. Pellet recycle control in pellet impact drilling: Pat. USA No. 2841365, cl. 255-1.8. Fil. 10.27.1953; Publ. 07.01.1958.
27. Momentum pellet impact drilling apparatus: Pat. USA No. 2807442, cl. 255-61. Fil. 01.29.1952; Publ. 09.24.1957.
28. Шароструйный снаряд для бурения скважин: А.с. № 939710, Е 21 В 7/18. № 3009898; заявл. 02.12.80; опубл. 30.06.82.
29. Controlling off-bottom position of pellet impact drill: Pat. USA No. 2728557, cl. 255-61. Fil. 07.15.1953; Publ. 12.27.1955.
30. Reverse circulation pellet impact drilling and coring apparatus: Pat. USA No. 2717761, cl. 255-18. Fil. 01.29.1952; Publ. 09.13.1955.
31. Способ эрозионного бурения скважин и устройство для его осуществления: А.с. № 870705, Е 21 С 37/16, Е 21 С 21/00, Е 21 В 7/18. № 2798122/22-03; заявл. 18.07.1979; опубл. 07.10.1981.
32. Урниш В.В., Саруев Л.А., Саруев А.Л. Оптимизация режимов шароструйного бурения регулированием расстояния от снаряда до забоя // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2018. – Т. 329. – № 4. – С. 162–170.
33. Способ шароструйного бурения скважин: пат. РФ № 2640445, С1. № 2016146972; заявл. 29.11.2016; опубл. 09.01.2018.

Поступила 08.04.2022 г.

Информация об авторах

Исаев Е.Д., аспирант отделения нефтегазового дела Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Ковалев А.В., кандидат технических наук, доцент отделения нефтегазового дела Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Саруев Л.А., доктор технических наук, профессор отделения нефтегазового дела Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 622.243.43

DEVELOPING RECOMMENDATIONS FOR OPTIMIZING THE DESIGN OF THE DRILLING BIT FOR PELLET IMPACT DRILLING

Evgeniy D. Isaev¹,
pelletdrilling@gmail.com

Artem V. Kovalev¹,
arteka011287@mail.ru

Lev A. Saruev¹,
saruevla@tpu.ru

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

Relevance. Despite the active development of renewable energy sources, fossil fuels still occupy a leading position among the known energy resources. According to forecasts, in the coming decades Russia will remain one of the largest world exporters of fossil fuels. In Russia, the issue of maintaining the volume of extraction of minerals is becoming more and more acute. This requires the exploration of new deposits, as well as the development of new solutions that allow carrying out the work in difficult conditions. Pellet impact drilling can be one of such solutions. Some researchers have worked on the development of this drilling method. A large number of different pellet impact drilling bits have been proposed. At the same time, there is still no design accepted as the most rational one.

Purpose: development of recommendations for the design of a drilling bit for pellet impact drilling, which most fully meets the requirements of geological exploration and mining industries.

The object of the research is a drilling bit for pellet impact drilling.

Methods: review of literary sources; systematization of the classification features of various designs of drilling bits for pellet impact drilling; analysis of previously developed designs according to the classification developed in this work.

Results. It was found that the highest mechanical speed of pellet impact drilling is achieved when using a drilling bit consisting of one mixing chamber, cylindrical in shape, with a diffuser on the lower edge. In this case, the rise of the pellets above the inlet ports must be limited by a retarding device, and the distance between the drilling bit and the well bottom must be maintained without using the elements contacting with the well bottom. The paper proposes a design of the drilling bit which meets the mentioned criteria.

Key words:

Pellet impact drilling, pellet impact drilling bit, ejector, jet device, percussion drilling.

REFERENCES

- Ihnatov A. Analyzing mechanics of rock breaking under conditions of hydromechanical drilling. *Mining of Mineral Deposits*, 2021, vol. 15, Iss. 3, pp. 122–129.
- Ihnatov A.O., Koroviaka Ye.A., Pinka J., Rastsvietaiev V.O., Dmytruk O.O. Geological and mining-engineering peculiarities of implementation of hydromechanical drilling principles. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2021, vol. 1, pp. 11–18.
- Ihnatov A., Koroviaka Y., Rastsvietaiev V., Tokar L. Development of the rational bottomhole assemblies of the directed well drilling. *Gas Hydrate Technologies: Global Trends, Challenges and Horizons*, 2020, vol. 230, pp. 1–14.
- Ignatov A.O., Vyatkin S.S. *Kulestruminniy pristryi dlya burinnya svedlovin* [Bullet jet device for drilling wells]. Patent Ukraine, 102708 no. a201107452, 2013.
- Cheng Xiaoze, Ren Fushen, Fang Tiancheng, Chang Yulian. Experiment of rock breaking by particle-jet coupling impact. *Acta Petrolei Sinica*, 2018, vol. 39, no. 2, pp. 232–239.
- Tiancheng Fang, Fushen Ren, Baojin Wang, Jianxun Cheng, Hanxu Liu. Particle jet impact deep-rock in rotary drilling: Failure process and lab experiment. *PLoS ONE*, April 28, 2021, pp. 1–19.
- Fushen Ren, Baojin Wang, Xiaoze Cheng, Suli Chen, Ruoxu Ma, Yang Li, Jianhua Liu. Design and experimental investigation about a simulation device for particle impact rock breaking. *International Conference on Experimental Mechanics 2014*. Singapore, 2015. Vol. 9302, pp. 1–10.
- Lei Li, Fangxiang Wang, Tianyang Li, Xiaodong Dai, Xueyang Xing, Xiancheng Yang. The effects of inclined particle water jet on rock failure mechanism: Experimental and numerical study. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2020, vol. 185, pp. 1–12.
- Fushen Ren, Tiancheng Fang, Xiaoze Cheng, Jianxun Cheng. Failure volume under particle water-jet impact in deep well drilling engineering: Mathematical modeling and verification analysis. *Alexandria Engineering Journal*, 2020, vol. 60, pp. 1839–1849.
- Tiancheng Fang, Baojin Wang, Jianxun Cheng, Fushen Ren, Fushen Ren. Stress modeling and simulation analysis of particle impact rock-breaking. *2020 7th International Forum on Electrical Engineering and Automation*. Hefei, China, 2020. Vol. 1, pp. 4866–4881.
- Fushen Ren, Tiancheng Fang, Xiaoze Cheng. Study on rock damage and failure depth under particle water-jet coupling impact. *International Journal of Impact Engineering*, 2020, vol. 139, p. 103504.
- Fushen Ren, Tiancheng Fang, Xiaoze Cheng. Study on rock-breaking depth and damage area under particle jet impact. *Shock and Vibration*, 2020, vol. 2020, pp. 1–12.
- Fushen Ren, Tiancheng Fang, Xiaoze Cheng. Theoretical modeling and experimental study of rock-breaking depth in particle jet impact drilling process. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2019, vol. 183, pp. 1–12.
- Fangxiang Wang, Ruihe Wang, Weidong Zhou, Guichun Chen. Numerical simulation and experimental verification of the rock damage field under particle water jet impacting. *International Journal of Impact Engineering*, 2017, vol. 102, pp. 169–179.
- Zaurbekov S.A. *Povyshenie effektivnosti prizabojnykh gidrodinamicheskikh protsessov pri sharostruynom burenii skvazhin*. Dis. Kand. nauk [Increasing the efficiency of bottomhole hydrodynamic processes during pellet impact drilling of wells. Cand. Diss.]. Almaty, 1995. 141 p.
- Eckel I.E., Deily F.H., Ledgerwood L.W. Development and testing of jet pump pellet impact drill bits. *Transaction AIME*, 1956, vol. 207, pp. 1–15.

17. Uvakov A.B. *Sharostruynoe burenie* [Pellet impact drilling]. Moscow, Nedra Publ., 1969. 207 p.
18. Ledgerwood L.W. Jr., Boucherlulsa F.G. *Combination pellet impact drill and annulus cutting drill*. Patent USA no. 2698736, 1955.
19. Uvakov A.B., Shtrasser V.V. *Sharostruyny snaryad dlya bureniya skvazhin* [Pellet impact drilling bit for drilling of wells]. Patent no. 417599, 1974.
20. Zubkova T.N. *Sharostruyny snaryad dlya bureniya skvazhin* [Pellet impact drilling bit for drilling of wells]. Patent RF no. 2114274, 1998.
21. Shtrasser V.V. *Issledovanie protsessov razrusheniya gornykh porod udarami sharov (k teorii sharostruynogo bureniya)*. Dis. Kand. nauk [Investigation of the processes of destruction of rocks by impacts of pellets (to the theory of pellet impact drilling)]. Cand. Diss.]. Alma-Ata, 1966. 217 p.
22. Zubkova T.N. *Ustroystvo dlya sharostruynogo bureniya skvazhin* [Device for pellet impact drilling of wells]. Patent RF no. 2124620, 1999.
23. Williams P.S. *Pellet impact drilling apparatus*. Patent USA no. 2868509, 1959.
24. Orloff J.E. *Pellet impact drill bit with controlled pellet return*. Patent USA no. 2779571, 1957.
25. Williams P.S. *Combination of pellet impact drilling and rotary shot drilling*. Patent USA no. 2727727, 1955.
26. Ramsey G.H., Deily F.H. *Pellet recycle control in pellet impact drilling*. Patent USA no. 2841365, 1958.
27. Ledgerwood L.W. *Momentum pellet impact drilling apparatus*. Patent USA no. 2807442, 1957.
28. Korotkov V.P. *Sharostruyny snaryad dlya bureniya skvazhin* [Pellet impact drilling bit for drilling of wells]. Patent RF no. 939710, 1982.
29. McNatt E.M. *Controlling off-bottom position of pellet impact drill*. Patent USA no. 2728557, 1955.
30. Ledgerwood L.W. *Reverse circulation pellet impact drilling and coring apparatus*. Patent USA no. 2717761, 1955.
31. Derbenev L.S., Bogoliubov A.A., Kapustin A.A., Karkashadze G.G., Yanchenko G.A. *Sposob erozionnogo bureniya skvazhin i ustroystvo dlya ego osushchestvleniya* [Erosive well drilling method and device for its implementation]. Patent no. 870705, 1981.
32. Urnish V.V., Saruev L.A., Saruev A.L. Optimization of pellet impact drilling regimes by regulation of spacing between a drill bit and a hole bottom. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, iss. 4, pp. 162–170. In Rus.
33. Kovalev A.V., Urnish V.V., Saruev L.A., Gorbenko M.V., Ryabchikov S.Ya., Isaev E.D., Vagapov A.R., Epikhin A.V. *Sposob sharostruynogo bureniya skvazhin* [Method of pellet impact drilling of wells]. Patent RF no. 2640445, 2018.

Received: 8 April 2022.

Information about authors

Evgeniy D. Isaev, graduate student, National Research Tomsk Polytechnic University.

Artem V. Kovalev, Cand Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Lev A. Saruev, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 621.311.238; 621.311.22

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ СХЕМЫ ГАЗОПАРОВОЙ УСТАНОВКИ С ГЛУБОКОЙ УТИЛИЗАЦИЕЙ И ОТПУСКОМ ТЕПЛОТЫ

Галашов Николай Никитович,
gal@tpu.ru

Туболев Александр Анатольевич,
Tubolev@tpu.ru

Беспалов Виктор Владимирович,
vic@tpu.ru

Минор Александр Анатольевич,
aam29061994@gmail.com

Болдушевский Евгений Сергеевич,
franky575@rambler.ru

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

Актуальность работы обусловлена совершенствованием тепловых схем и оптимизацией параметров газопаровых установок с целью сокращения потребления при выработке электроэнергии и отпуске теплоты такого энергоресурса, как природный газ. Подкрепленные расчетами предложения по совершенствованию схем газопаровых установок позволят повысить их коэффициент использования теплоты топлива и сократить количество экологически вредных выбросов в окружающую среду.

Цель: проведение по разработанной методике разностороннего параметрического анализа с выбором оптимальных параметров режимов работы предложенных тепловых схем газопаровых установок для повышения их энергоэффективности.

Объекты: газопаровые установки с отпуском электроэнергии и теплоты на основе газовых турбин с впрыском пара в камеру сгорания и глубокой утилизацией теплоты, и влаги из продуктов сгорания.

Методы: численные методы исследования на основе материальных и энергетических балансов систем и элементов газопаровых установок.

Результаты. Разработана методика расчета тепловой схемы газопаровой установки с отпуском электроэнергии и теплоты, и глубокой утилизацией теплоты и влаги из продуктов сгорания. Определено, что введение в схему утилизатора теплоты и влаги позволяет понизить температуру выходящих из утилизатора теплоты продуктов сгорания до 15...45 °С, а также уловить из них до 90...120 % влаги. Для снижения температуры охлаждающей воды на входе в утилизатор теплоты и влаги в схему введен тепловой насос, который также позволяет повысить температуру сетевой воды в системе теплоснабжения. Новая схема за счет существенного сокращения потери теплоты с уходящими газами позволяет повысить коэффициент использования теплоты топлива на 45...100 % по сравнению со схемой без отпуска теплоты при расчете по нижней теплоте сгорания топлива. Выявлено, что применение данной схемы наиболее выгодно при степени сжатия в компрессоре от 20 до 80 и температуре на выходе камеры сгорания 1400...1700 °С, при этом коэффициент использования теплоты топлива нетто будет 102...107 %; электрический КПД нетто 50...58 %; расход впрыска пара 5,5...8,5 кг/кг топлива; избыток уловленного конденсата 0,2...1,2 кг/кг топлива; удельная тепловая нагрузка потребителя теплоты 23...28 МДж/кг топлива.

Ключевые слова:

Газотурбинная установка, газопаровая установка, впрыск пара, котел-утилизатор, продукты сгорания, утилизатор теплоты, тепловой насос.

Введение

В Энергетической стратегии России до 2035 г. определено, что такие энергоресурсы, как природный газ, уголь и нефть, еще длительное время будут основой традиционного энергоснабжения [1]. В связи с этим актуальна разработка высокоэффективных энергосберегающих технологий с обеспечением снижения расхода углеводородного топлива и вредных выбросов от его сжигания.

На современном этапе основным путем повышения экономичности сжигания углеводородного топлива на ТЭС является комбинированный газопаровой цикл на основе циклов Брайтона и Ренкина [2].

В настоящее время широкое распространение получила технология с раздельной работой циклов Брайтона и Ренкина, при этом в цикле Брайтона в ка-

мере сгорания подводится теплота от сгорания топлива, а затем отводимая после газовой турбины теплота используется в котле-утилизаторе для получения перегретого пара и работы его в цикле Ренкина. Установка на основе этой технологии требует наличия двух типов турбин: газовой в цикле Брайтона и паровой в цикле Ренкина, что усложняет схему и эксплуатацию, а также стоимость установки. Но пока этот путь развития электроэнергетики является основным, т. к. мощные парогазовые установки на основе этой технологии имеют максимальный электрический КПД выше 63 % [3].

Второй путь развития газопаровой технологии заключается в совмещении работы продуктов сгорания топлива и потока пара в одной газопаровой турбине. Установка получается проще и дешевле, но, если не

производить конденсацию пара из парогазовой смеси продуктов сгорания, потеря теплоты с уходящими газами увеличивается и КПД падает, кроме того, увеличивается тепловое и паровое загрязнение окружающей среды. Также при этом необходима подготовка добавочной воды, компенсирующая потери введенного в цикле пара. Поэтому для установок этого типа важно обеспечить конденсацию пара из парогазовой смеси продуктов сгорания.

Теоретические вопросы работы газопаровых установок (ГПУ) с вводом воды и водяного пара в камеру сгорания газотурбинной установки (ГТУ) были обобщены В.А. Зысиным [4], Л.В. Арсеньевым и В.Г. Тырышкиным [5]. За рубежом цикл ГТУ с впрыском насыщенного водяного пара в камеру сгорания был запатентован в 1981 г. (цикл Чженя) [6]. Там эта технология получила название STIG (Steam Injected Gas Turbine).

Ввод пара в камеру сгорания ГТУ и на охлаждение турбины позволяет: повысить мощность газовой турбины, разгрузить воздушный компрессор, понизить температуру сгорания, продлить срок службы камеры сгорания и турбины, а также уменьшить выбросы NOx [4–17].

Применение технологии STIG фирмой General Electric [18, 19] показало значительное увеличение мощности и КПД установок, а также сокращение NOx в уходящих газах.

Основным недостатком цикла Чженя является то, что при отводе уходящих газов без конденсации водяного пара получаем разомкнутый цикл Ренкина, при этом введенный в цикле пар полностью теряется и требуется постоянная подготовка добавочной воды высокого качества. Также происходит повышенное тепловое и паровое загрязнение окружающей среды. Конденсация водяного пара из уходящих газов позволяет замкнуть цикл Ренкина, отказаться от подготовки добавочной, использовать теплоту конденсации для подогрева воды и отпуска теплоты потребителям, уменьшить тепловое загрязнение окружающей среды. Также с конденсатом удаляется часть углекислого газа, полученного при горении топлива. Избыточный конденсат можно полезно использовать на станции.

Поэтому вопросы конденсации водяного пара из уходящих газов являются весьма актуальными, и им посвящено большое число научных исследований [20–25].

Данная работа является продолжением работы [26], в которой рассматривается модель расчета схемы газопаровой установки с впрыском водяного пара в камеру сгорания газотурбинной установки. Показано, что впрыск пара в камеру сгорания ГТУ и для охлаждения газовой турбины позволяет существенно снизить расход воздуха и коэффициент избытка воздуха в камере сгорания, что снижает мощность на сжатие в компрессоре, а также температуру горения топлива в камере сгорания, что уменьшает выбросы оксидов азота в окружающую среду. Смесь газов с высоким содержанием водяного пара позволяет также примерно в два раза повысить удельную мощность газовой турбины.

В этой работе рассматривается методика расчета схемы газопаровой установки с вводом пара в камеру сгорания и на охлаждение элементов газовой турби-

ны с утилизацией теплоты и влаги из продуктов сгорания топлива и отпуском теплоты в систему теплоснабжения с использованием теплонасосной установки. Газопаровая установка работает по разомкнутому циклу Брайтона и замкнутому циклу Ренкина.

Схема газопаровой установки

Схема ГПУ приведена на рис. 1.

Процессы в схеме ГПУ от входа воды в КУ в точке 12 до выхода парогазовой смеси после экономайзера в точке 9 подробно описаны в работе [26]. Рассмотрим процессы в добавленных элементах схемы. После экономайзера парогазовая смесь разделяется на два потока. Основной идет в камеру орошения, где охлаждается холодным конденсатом в изохорном процессе 9–20 до температуры мокрого термометра (рис. 2), после чего отдает теплоту охлаждающей воде в активной насадке в изобарном процессе 20–21 и, пройдя через сепаратор, смешивается со вторым горячим потоком с температурой t_9 до температуры t_{10} , которая обеспечивает работу газоходов и дымовой трубы без конденсации. Расходы первого и второго потоков регулируются положением Ш. Образовавшийся конденсат с температурой t_k сжимается в адиабатном процессе 22–23 в КН до давления 0,2...0,3 МПа, после чего разделяется на два потока: один идет в камеру орошения, а второй – на вход ПВ, где смешивается с сырой водой, которая с температурой t_{24} добавляется к конденсату, если его не хватает для питания КУ. Если температура воды не достаточна для обработки в ХВО, то она подогревается в ПВ в изобарном процессе 25–26, до необходимой температуры. Подогрев производится паром с выхода КУ в состоянии 17. Слив конденсата греющего пара из ПВ производится в ДВ. Также в ДВ подаются, прошедший через ОВ поток воды из ХВО и поток пара с выхода КУ через регулятор давления РД, при этом давление в РД падает от P_{17} до 0,12...0,25 МПа. Очищенная от кислорода и углекислоты в ДВ вода через ОВ подается на вход питательного насоса. При этом в ОВ температура воды снижается с t_{11} до t_{12} °С. Нагретая в АН охлаждающая вода с температурой t_{31} , которая на 5...6 °С ниже температуры мокрого термометра t_{20} , насосом подается в СП, где нагревает сетевую воду с температуры t_{43} до t_{41} . Из СП охлаждающая вода с температурой t_{33} идет в Итн, где охлаждается до температуры t_{34} , которая должна быть ниже температуры конденсата t_{21} . В испарителе теплового насоса при температуре t_{35} , которая на 5 °С ниже температуры t_{34} , испаряется фреон, после чего нагревается в регенераторе с температуры t_{35} до температуры t_{36} и поступает в компрессор теплового насоса, где в адиабатном процессе сжимается до температуры t_{37} и идет в конденсатор теплового насоса, в котором нагревает сетевую воду до температуры t_{42} , которая на 5 °С ниже температуры t_{37} . Из конденсатора теплового насоса сконденсировавшийся фреон в изобарном процессе 38–39 охлаждается в регенераторе и через дроссельный клапан в состоянии 40 поступает в испаритель теплового насоса. Компрессор теплового насоса приводится в действие электродвигателем.

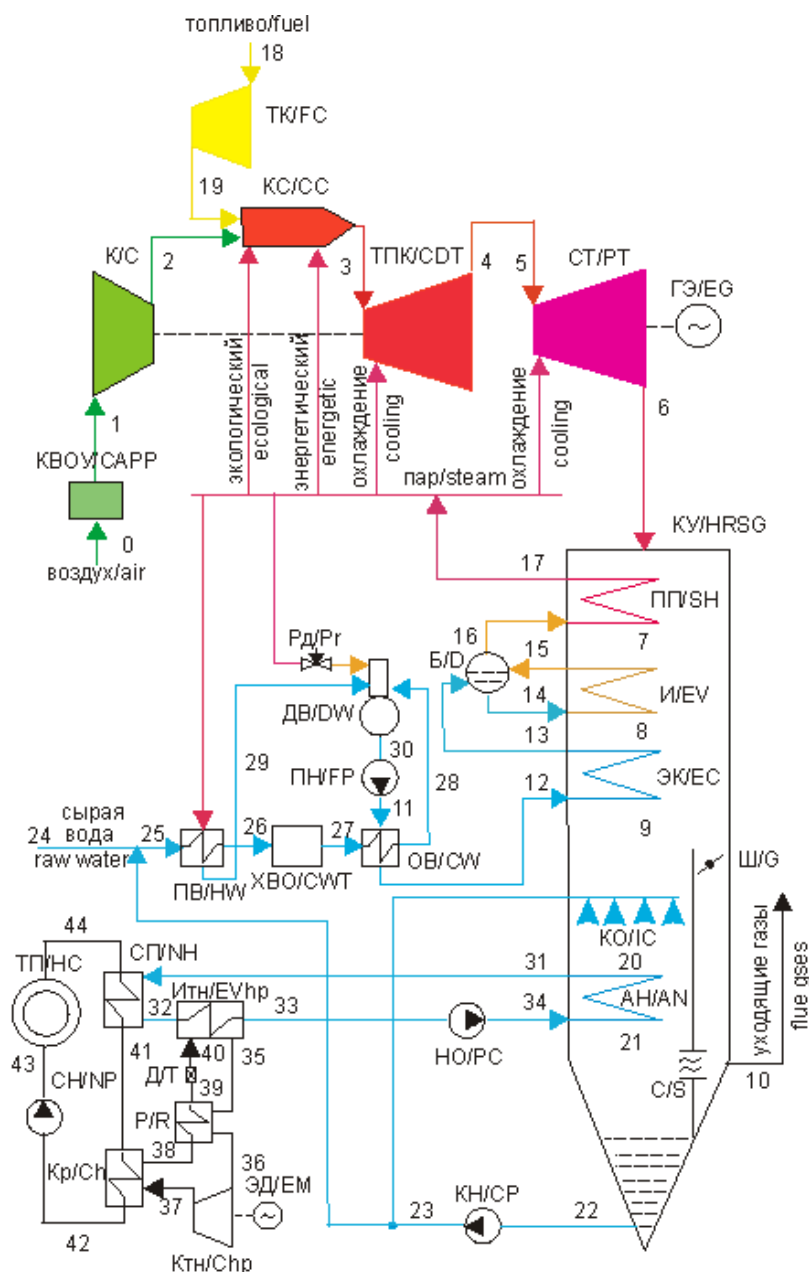


Рис. 1. Схема газопаровой установки: КВОУ – комплексная воздухоочистная установка; К – компрессор; КС – камера сгорания; ТК – топливный компрессор; ТПК – турбина привода компрессора; СТ – силовая турбина; КУ – котел-утилизатор; ПП – пароперегреватель; И – испаритель; Б – барабан; ЭК – экономайзер; ГЭ – генератор электрического тока; ХВО – химводоочистка; ПН – питательный насос; ДВ – деаэратор воды; Рд – регулятор давления; ОВ – охладитель воды; ПВ – подогреватель воды; КО – камера орошения; АН – активная насадка; Ш – шибер; С – сепаратор; КН – конденсатный насос; НО – насос охлаждающей воды; СН – сетевой насос; СП – сетевой подогреватель; Итн – испаритель теплового насоса; Р – регенератор; Ктн – компрессор теплового насоса; ЭД – электродвигатель; Кр – конденсатор теплового насоса; Д – дроссельный клапан; ТП – потребители теплоты

Fig. 1. Cycle diagram of combined-cycle plants: CAPP – complete air purification plant; C – compressor; CC – combustion chamber; FC – fuel compressor; CDT – compressor drive turbine; PT – power turbine; HRSG – heat recovery steam generator; SH – superheater; EV – evaporator; D – drum; EC – economizer; EG – electric generator; CWT – chemical water treatment; FP – feed pump; DW – water deaerator; Pr – pressure regulator; CW – cooler of water; HW – heater of water; IC – irrigation chamber; AN – active nozzle; G – gate; S – separator; CP – condensate pump; PC – pump of cooling water; NP – network pump; NH – network heater; Evhp – heat pump evaporator; R – regenerator; Chp – heat pump compressor; EM – electric motor; Ch – heat pump condenser; T – throttle; HC – consumers of heat

Процессы утилизации теплоты и влаги из продуктов сгорания наглядно можно представить в $h-d$ диаграмме Рамзина (рис. 2). Продукты сгорания после экономайзера в состоянии 9, которое принимается на

10°C выше температуры точки росы, с влажностью d_9 поступают в камеру орошения, куда также подается конденсат с температурой $t_k = t_{22} = t_{21}$. В результате смешения продуктов сгорания с конденса-

том в изэнтальпийном процессе 9–20 температура смеси снижается до температуры мокрого термометра, которая определяется точкой 20 на линии относительной влажности $f_i=100\%$, при этом влагосодержание увеличивается до d_{20} . В результате отвода теплоты в активной насадке от продуктов сгорания к охлаждающей воде при относительной влажности $f_i=100\%$ температура смеси продуктов сгорания снижается до t_{21} , а влагосодержание – до d_{21} . При этом температура охлаждающей воды увеличивается с t_{34} до t_{31} .

В КУ необходимо обеспечить разности температур между продуктами сгорания и нагреваемой водой: Δt_{6-17} не ниже $30\text{ }^\circ\text{C}$; Δt_{8-14} не ниже $10\text{ }^\circ\text{C}$; Δt_{9-12} не ниже $20\text{ }^\circ\text{C}$; Δt_{20-31} не ниже $5\text{ }^\circ\text{C}$; Δt_{21-34} не ниже $5\text{ }^\circ\text{C}$. $T-Q$ диаграмма теплообмена в котле-утилизаторе приведена на рис. 3.

Методика расчета тепловой схемы газопаровой установки

Расчет параметров функционирования газопаровой установки производится численно на основе двух итерационных процессов. Блок-схема алгоритма расчета схемы ГПУ приведена на рис. 4.

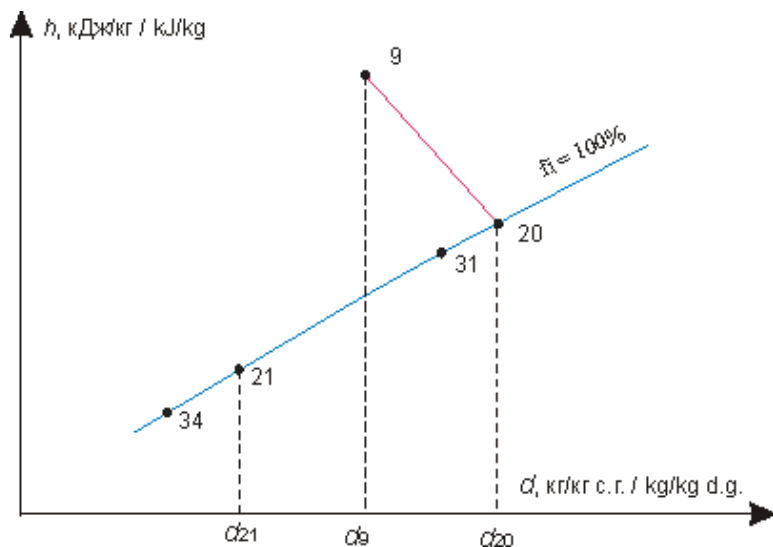


Рис. 2. $h-d$ диаграмма процесса в камере орошения и активной насадке; номера точек на линиях процессов соответствуют номерам на схеме рис. 1

Fig. 2. $h-d$ process diagram in the irrigation chamber and active nozzle; the numbers of points on the lines of the cycles correspond to the numbers on the diagram in Fig. 1

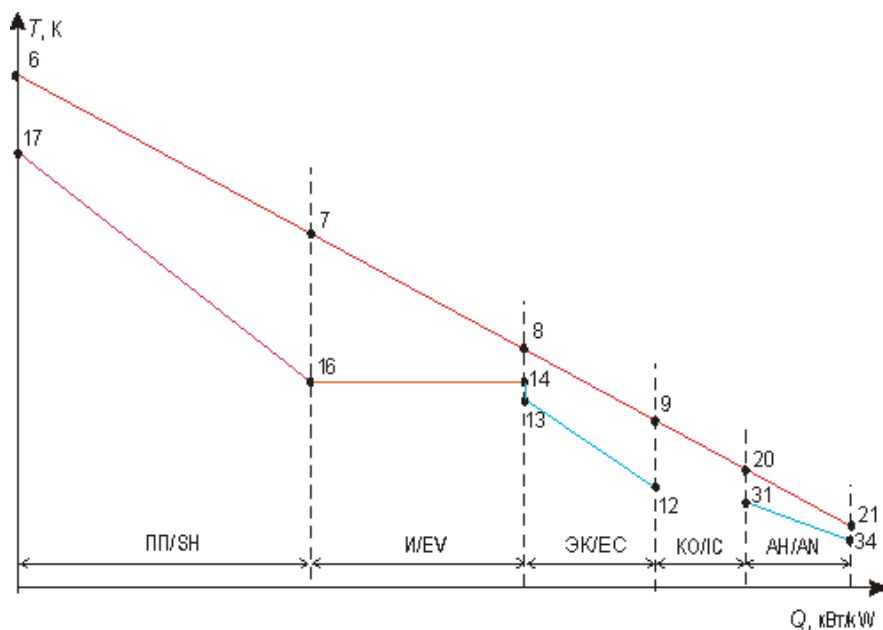


Рис. 3. $T-Q$ диаграмма теплообмена в котле-утилизаторе: ПП – пароперегреватель; И – испаритель; ЭК – экономайзер; КО – камера орошения; АН – активная насадка. Номера точек на линиях соответствуют номерам на рис. 1

Fig. 3. $T-Q$ diagram of heat transfer in the waste heat boiler: SH – superheater; EV – evaporator; EC – economizer; IC – irrigation chamber; AN – active nozzle. The numbers of points on the lines correspond to the numbers in Fig. 1

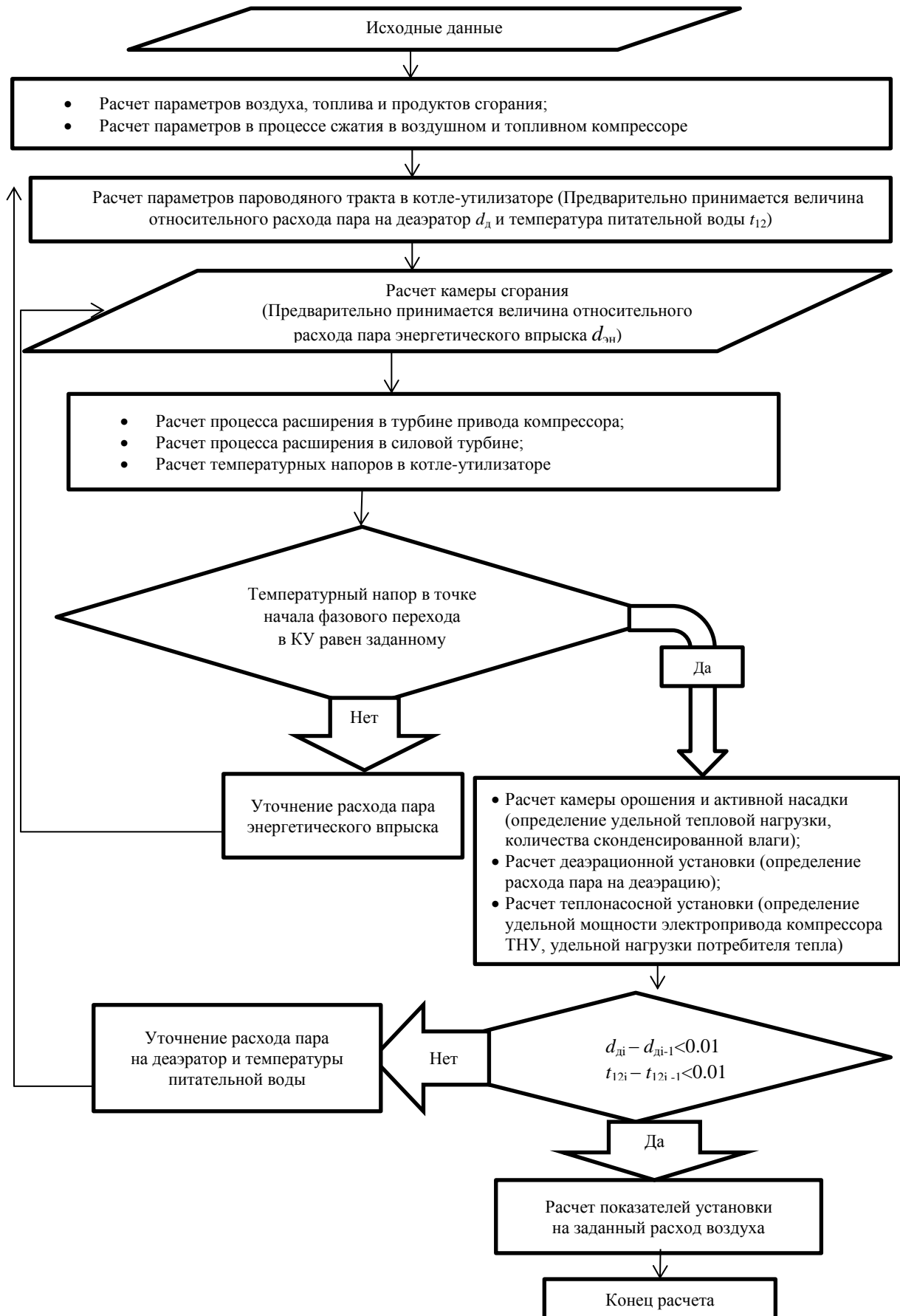


Рис. 4. Блок-схема расчета газопаровой установки

Fig. 4. Block diagram of the calculation of a gas-steam plant

Исходные данные:

Первые двенадцать пунктов повторены из работы [26].

- 1) параметры наружного воздуха: $P_{нв}$, $t_{нв}$, относительная влажность $\phi_{нв}$;
- 2) состав природного газа: CH_4 , C_2H_6 , C_3H_8 и т. д.;
- 3) параметры природного газа: P_1 , t_1 ;
- 4) относительные потери давления: $\delta P_{квоу}$, $\delta P_{пн-ку}$, $\delta P_{ку}$, $\delta P_{ку.пс}$, $\delta P_{к.вых}$, $\delta P_{кс}$, $\delta P_{тк-кк}$, $\delta P_{тпк-ст}$, $\delta P_{ку-впр}$;
- 5) КПД: η_k , $\eta_{тк}$ – воздушного и топливного компрессора; $\eta_{м.к}$, $\eta_{м.тпк}$ – механический компрессора и ТПК; $\eta_{тпк}$, $\eta_{ст}$ – внутренний относительный ТПК и СТ; $\eta_{эг}$, $\eta_{эл}$ – электрогенератора и электропривода; $\eta_{ск}$ – камеры сгорания;
- 6) степень сжатия компрессора ϵ_k ;
- 7) температура продуктов сгорания на выходе КС, t_3 ;
- 8) давление $P_{пв}$ и температура $t_{пв}=t_{24}$;
- 9) относительный расход экологического пара на впрыск $d_{эк}$;
- 10) относительный расход пара на охлаждение $\delta_{охл}$ и его доля на ТПК $K_{охл}$;
- 11) разности температур: $\Delta t_{6-17}=30$, $\Delta t_{8-14}=10$, $\Delta t_{14-13}=5$, $\Delta t_{9-12}=20$;
- 12) расход воздуха на входе в компрессор G_k .
Дальше дополнительно необходимо ввести:
- 13) приближенный относительный расход пара на деаэрацию $d_d=0,005 \dots 0,001$;
- 14) приближенную температуру питательной воды на входе КУ $t_{12}=60 \dots 70$ °С;
- 15) разность температур: $\Delta t_{20-31}=6 \dots 10$;
- 16) температуру конденсата $t_k=t_{22}=t_{21}=20 \dots 50$ °С;
- 17) температуру воды на входе активной насадки $t_{34}=t_{21}-(10 \dots 15)$;
- 18) разности температур: $\Delta t_{32-41}=\Delta t_{38-42}=\Delta t_{36-35}=\Delta t_{33-35}=5 \dots 8$ °С;
- 19) относительный расход продуктов сгорания через теплоутилизатор $\chi=0,7 \dots 1,0$;
- 20) повышение температуры в насосах $\Delta t_{нас}=0,1 \dots 0,2$ °С;
- 21) изотропный КПД компрессора ТНУ $\eta_{ктн}=0,82 \dots 0,86$;
- 22) электромеханический КПД электродвигателя компрессора ТНУ $\eta_{эм}=0,96 \dots 0,98$.

Модель расчета ГПУ без утилизации теплоты и влаги из продуктов сгорания и отпуска теплоты подробно описана в работе [26]. В данной работе рассмотрим вопросы расчета остальных разделов представленной на рис. 4 модели расчета ПГУ.

За основу расчета теплоутилизатора взят принцип работы контактного теплообменника с активной насадкой (КТАН), который состоит из камеры орошения и активной насадки для подогрева воды.

Расчет камеры орошения

Камера орошения – это теплообменный аппарат смешивающего типа, в который входит расход парогазовой смеси g_9 в состоянии 9 и охлаждающий конденсат в состоянии 22 (рис. 1, 2), при этом в изотермическом процессе парогазовая смесь насыщается водяным паром до относительной влажности

$\phi=100$ % и охлаждается до температуры мокрого термометра. В результате расчета на основе уравнений материального и теплового баланса определяются расход охлаждающего конденсата $g_{ор}$ и расход парогазовой смеси на выходе g_{20} в кг/кг топлива:

$$g_{20}=g_9+g_{ор};$$

$$g_{20} \cdot h_{20}=g_9 \cdot h_9+g_{ор} \cdot h_{22},$$

где $h_{20}=h_9$; $h_{22}=c_{рв} \cdot t_{22}$, где $c_{рв}=4,19$ кДж/(кг·К) – удельная изобарная теплоемкость воды.

Расчет активной насадки

Активная насадка – это теплообменный аппарат рекуперативного типа, который состоит из пучка труб, где в межтрубном пространстве расход парогазовой смеси g_{20} охлаждается с состояния 20 (рис. 2) до состояния 21, а его влагосодержание уменьшается от d_{20} до d_{21} , при этом на 1 кг топлива образуется $g_{кон}=g_{ст}(d_{20}-d_{21})$ кг конденсата, который при конденсации с теплотой парообразования r_k передает теплоту воде в активной насадке, где $g_{ст}$ – относительный расход сухой парогазовой смеси продуктов сгорания, определяется при расчете продуктов сгорания топлива. В трубах расход охлаждающей воды $g_{охл.в}$ нагревается с состояния 34 до состояния 31. В результате расчета по уравнениям материального и теплового баланса определяются расходы парогазовой смеси и охлаждающей воды:

$$g_{21}=g_{20}-g_{кон};$$

$$g_{охл.в}=(g_{20} \cdot h_{20}-g_{21} \cdot h_{21}+g_{кон} \cdot r_k)/(h_{31}-h_{34}),$$

где энтальпии определяются по заданным или рассчитанным выше давлениям и температурам.

Разница расхода конденсата $\Delta g_{кон}=g_{кон}-g_{охл.в}-d_{ж}-d_{эн}-d_{охл}$. Если $\Delta g_{кон}>0$, то в схеме будет избыток конденсата, который можно полезно использовать, иначе будет недостаток, который необходимо возместить добавочной водой в точке 24.

Расчет схемы подогрева питательной воды на входе в котел-утилизатор

Питательная вода в точке 25 (рис. 1) получается в результате смешения потока сырой воды в состоянии 24 с конденсатом после КН в состоянии 23. Сырая вода подается тогда, когда расхода конденсата недостаточно для получения необходимого для работы ГПУ пара. Если температура питательной воды ниже 35 °С, то она подогревается паром в ПВ до этой температуры и поступает на ХВО, откуда через ОВ идет в деаэрацию воды, где освобождается от кислорода и углекислоты и питательным насосом через ОВ с температурой на 10...20 °С выше температуры точки росы за водяным экономайзером поступает в экономайзер КУ. Расчет расходов воды и пара на подогреватель воды и деаэрацию производится на основе уравнений материального и теплового баланса. При этом расходы и параметры потоков определяются на основе итерационного расчета. Итерационный расчет начинается с предварительно заданных расхода пара на деаэрацию d_d и температуры питательной воды на входе в КУ t_{12} , а заканчивается, когда эти параметры

на двух итерациях – i и $i-1$ – будут определены с относительной погрешностью меньше 1 %.

Расчет ТНУ

Процессы в цикле теплового насоса приведены на рис. 5.

В изобарном процессе 40–35 подводится теплота в испарителе теплового насоса от охлаждающей воды перед активной насадкой. В процессе 35–36 перегревается в рекуператоре полученный в испарителе пар фреона, после чего в адиабатном процессе 36–37 пар сжимается в компрессоре теплового насоса, и в изобарном процессе 37–38 в конденсаторе теплота передается сетевой воде, дальше в рекуператоре в процессе 38–39 теплота от конденсата подогревает пар перед компрессором. В процессе 39–40 в дросселе конденсат расширяется с парообразованием при падении давления от давления в конденсаторе $P_{\text{кон}}$ до давления в испарителе $P_{\text{исп}}$. Давление насыщения фреона $P_{\text{кон}}$ определяется по температуре $t_{\text{кон}}=t_{33}+\Delta t_{35-33}$, где $t_{33}=t_{34}$. Давление насыщения фреона $P_{\text{исп}}$ определяется по температуре $t_{\text{исп}}=t_{38}+\Delta t_{38-42}$.

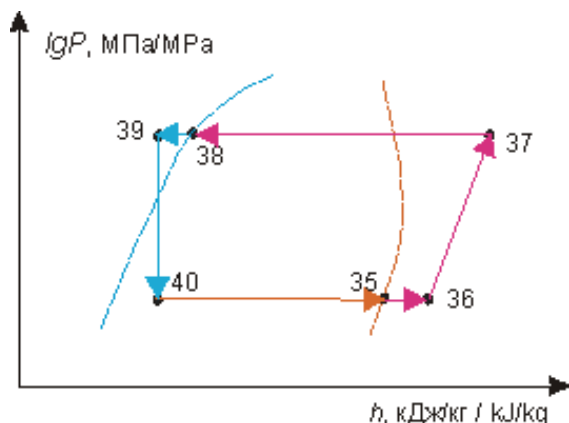


Рис. 5. Цикл теплового насоса в $\lg P-h$ диаграмме
 Fig. 5. Heat pump cycle in $\lg P-h$ diagram

Энтальпии воды и фреона определяются по давлению и температуре.

В качестве рабочего тела выбран фреон R141b. Выбор этого фреона обусловлен его высокими термодинамическими показателями и слабым влиянием на разрушение озонового слоя. Параметры фреона рассчитываются по функциям программы REFPROP8. Расчет с помощью этих функций подробно описан в [26].

В результате расчета ТНУ определяются расход фреона $g_{\text{ф}}$, нагрев воды в конденсаторе и охлаждение в испарителе, передача теплоты в регенераторе и затраты мощности на привод компрессора.

Расход фреона определяется по уравнению теплового баланса испарителя

$$g_{\text{ф}}=g_{\text{охл.в}}(h_{32}-h_{33})/(h_{35}-h_{40}).$$

Энтальпия в точке 39 определяется по уравнению теплового баланса рекуператора $h_{39}=h_{38}-(h_{36}-h_{35})$, где h_{38} – энтальпия насыщенной жидкости фреона, определяется по давлению $P_{\text{исп}}$; h_{35} , t_{35} – энтальпия и тем-

пература насыщенного пара фреона, определяются по давлению $P_{\text{кон}}$; энтальпия в точке 36 определяется по $P_{\text{кон}}$ и $t_{36}=t_{35}+\Delta t_{36-35}$.

Энтальпия в точке 37 определяется по уравнению адиабатного сжатия в компрессоре.

Последовательно определяются [26]:

- $s_{36}=\text{Entropy}(\text{"R141b"; "PT"; "SI WITH C"; } P_{\text{исп}}; t_{36})$;
- $h_{37s}=\text{Enthalpy}(\text{"R141b"; "PT"; "SI WITH C"; } P_{\text{кон}}; s_{36})$;
- $h_{37}=h_{36}+(h_{37s}-h_{36})/\eta_{\text{ктн}}$;
- $l_{\text{ктну}}=(h_{37}-h_{36})$ – удельная работа сжатия в компрессоре ТНУ;
- $q_{\text{к}}=h_{38}-h_{37}$ – удельная тепловая нагрузка конденсатора ТНУ;
- $\mu=q_{\text{к}}/l_{\text{ктну}}$ – коэффициент трансформации ТНУ;
- $q_{\text{тну}}=g_{\text{ф}} \cdot q_{\text{к}}$ – удельная теплопроизводительность ТНУ;
- $n_{\text{эд}}=g_{\text{ф}} \cdot l_{\text{ктну}}/\eta_{\text{эм}}$ – удельная мощность электродвигателя компрессора ТНУ.
- Расчет системы теплоснабжения

В системе теплоснабжения вода нагревается в сетевом подогревателе и конденсаторе ТНУ, поэтому определяются расход сетевой воды $g_{\text{св}}$ и температуры в точках 41, 42, 43 и 44.

Последовательно определяются:

- $t_{43}=t_{\text{ис}}$ и $t_{44}=t_{\text{ос}}$ – заданы в исходных данных;
- $t_{42}=t_{43}-\Delta t_{\text{нас}}$;
- $t_{41}=t_{32}-\Delta t_{32-41}$;
- $g_{\text{св}}=q_{\text{к}}/(t_{42}-t_{41})c_{\text{рв}}$;
- $q_{\text{сп}}=g_{\text{св}}(t_{41}-t_{44})c_{\text{рв}}$ – удельный нагрев воды в СП;
- $q_{\text{от}}=g_{\text{св}}(t_{43}-t_{44})c_{\text{рв}}$ – удельный отпуск теплоты потребителям.

Расчет показателей установки на заданный расход воздуха $G_{\text{к}}$

Последовательно определяются:

- $B_{\text{т}}=G_{\text{к}}/g_{\text{в}}$;
- $D_{\text{эн}}=d_{\text{эн}} \cdot B_{\text{т}}$;
- $D_{\text{эк}}=d_{\text{эк}} \cdot B_{\text{т}}$;
- $D_{\text{охл}}=d_{\text{охл}} \cdot B_{\text{т}}$;
- $N_{\text{ст}}=(D_{\text{эн}}+D_{\text{эк}}+D_{\text{охл}}+B_{\text{т}}+G_{\text{к}})\Delta h_{\text{ст}} \cdot \eta_{\text{м.ст}}$;
- $N_{\text{пн}}=(D_{\text{эн}}+D_{\text{эк}}+D_{\text{охл}})\Delta h_{\text{пн}}/\eta_{\text{м.пн}}$;
- $N_{\text{к}}=G_{\text{к}} \cdot \Delta h_{\text{к}}/\eta_{\text{м.к}}$;
- $N_{\text{тк}}=B_{\text{т}} \cdot \Delta h_{\text{тк}}/\eta_{\text{м.тк}}$;
- $N_{\text{эд}}=B_{\text{т}} \cdot l_{\text{ктну}} \cdot g_{\text{ф}}/\eta_{\text{м.ктну}}$;
- $N_{\text{но}}=B_{\text{т}} \cdot \Delta h_{\text{но}} \cdot g_{\text{охл.в}}/\eta_{\text{м.но}}$;
- $N_{\text{кн}}=B_{\text{т}} \cdot \Delta h_{\text{кн}} \cdot g_{\text{кон}}/\eta_{\text{м.кн}}$;
- $N_{\text{сн}}=B_{\text{т}} \cdot \Delta h_{\text{сн}} \cdot g_{\text{св}}/\eta_{\text{м.сн}}$;
- $N_{\text{пол}}=N_{\text{ст}} \cdot \eta_{\text{эг}} - N_{\text{пн}}/\eta_{\text{эп}} - N_{\text{тк}}/\eta_{\text{эп}} - N_{\text{эд}}/\eta_{\text{эп}} - N_{\text{но}}/\eta_{\text{эп}} - N_{\text{кн}}/\eta_{\text{эп}} - N_{\text{сн}}/\eta_{\text{эп}}$;
- $\eta_{\text{тпу}}=100 \cdot N_{\text{пол}}/(B_{\text{т}} \cdot Q_{\text{пр}})$, %;
- $\text{КИТТ нетто}=100 \cdot (N_{\text{пол}}+Q_{\text{от}})/(B_{\text{т}} \cdot Q_{\text{пр}})$, %;
- $Q_{\text{от}}=q_{\text{от}} \cdot B_{\text{т}}$;
- $G_{\text{охл}}=g_{\text{охл.в}} \cdot B_{\text{т}}$;
- $G_{\text{св}}=g_{\text{св}} \cdot B_{\text{т}}$;
- $G_{\text{ф}}=g_{\text{ф}} \cdot B_{\text{т}}$;
- $D_{\text{к}}=g_{\text{кон}} \cdot B_{\text{т}}$;
- $\Delta D_{\text{к}}=\Delta g_{\text{кон}} \cdot B_{\text{т}}$.

Методика расчета тепловой схемы ГПУ, которая позволяет производить исследования показателей в широком диапазоне изменения исходных параметров, реализована в виде программы в пакете электронных таблиц EXCEL с использованием языка программирования VBA MS Excel.

Достоверность алгоритма программы, модели и метода расчетов проверялась ручными расчетами при одинаковых исходных параметрах. При этом относительная погрешность не превышала 3 %.

Результаты расчета и их анализ

Для расчета были введены следующие исходные параметры:

- 1) параметры наружного воздуха: $P_{нв}=0,1013$ МПа, $t_{нв}=15$ °С; $\varphi_{нв}=0,6$;
- 2) состав природного газа: $CH_4=100$ %;
- 3) параметры природного газа: $P_f=0,2$ МПа; $t_f=5$ °С;
- 4) относительные потери давления: $\delta P_{кву}=0,01$, $\delta P_{пн-ку}=\delta P_{ку}=\delta P_{ку.пс}=\delta P_{к.вых}=\delta P_{кс}=\delta P_{тк-кс}=\delta P_{тк-ст}=0,03$, $\delta P_{ку-охл}=0,05$;
- 5) КПД: $\eta_k=0,86$, $\eta_{тк}=0,9$, $\eta_{мк}=0,995$, $\eta_{кк}=0,995$, $\eta_{м.тк}=0,995$, $\eta_{ткк}=0,9$, $\eta_{ст}=0,93$, $\eta_{эл}=0,982$, $\eta_{эл}=0,99$, $\eta_{пн}=0,8$;
- 6) степень сжатия компрессора: 2...80;
- 7) температура продуктов сгорания на выходе КС: 1000...1700 °С;
- 8) давление и температура добавочной воды: $P_{дв}=0,2$ МПа, $t_{дв}=10$ °С;
- 9) расход экологического пара на впрыск $d_{эк}=2$ кг/кг топлива;
- 10) расход пара на охлаждение: $\delta_{охл}=0,05$, $K_{охл}=0,7$;
- 11) расход воздуха на входе в компрессор $G_k=1$ кг/с;
- 12) приближенный удельный расход пара на деаэра-тор $d_d=0,1...0,5$ кг/кг топлива;
- 13) приближенная температура питательной воды на входе КУ $t_{12}=60...70$ °С;
- 14) разность температур: $\Delta t_{20-31}=6$;
- 15) температуру конденсата $t_k=t_{22}=t_{21}=45$ °С;
- 16) температуру воды на входе активной насадки $t_{34}=t_{21}-10$;

17) разности температур: $\Delta t_{32-41}=\Delta t_{38-42}=\Delta t_{36-35}=\Delta t_{33-35}=5$ °С;

18) относительный расход продуктов сгорания через теплоутилизатор $\chi=1$;

19) повышение температуры в насосах $\Delta t_{нас}=0,1$ °С;

20) изэнтропийный КПД компрессора ТНУ $\eta_{ктн}=0,86$;

21) электромеханический КПД электродвигателя компрессора ТНУ $\eta_{эм}=0,98$;

22) температура воды в прямой сети $t_{43}=70$ °С;

23) температура воды в обратной сети $t_{44}=49$ °С.

С помощью программы проведены расчеты, результаты которых представлены на рис. 6–10. Рисунки построены в зависимости от степени сжатия в компрессоре от 0 до 80 и температуры газов на выходе камеры сгорания от 1000 до 1700 °С. Расчеты проводились по низшей удельной теплоте сгорания природного газа.

На рис. 6, а приведена зависимость коэффициента использования теплоты топлива (КИТТ) нетто при отпуске теплоты в летний период на горячее водоснабжение при температуре в прямой сети 70 °С и обратной сети 49 °С. КИТТ нетто учитывает затраты теплоты и мощности на собственные нужды ГПУ. Видим, что КИТТ нетто находится в пределах 98...111 %. Это связано с тем, что он рассчитан по низшей удельной теплоте сгорания топлива, которая не учитывает теплоту конденсации водяного пара, а в данной ГПУ при отпуске теплоты в теплоутилизаторе конденсируется большой расход пара.

На рис. 6, б приведена зависимость коэффициента полезного действия нетто без отпуски теплоты. В этом случае КИТТ нетто равен КПД нетто. Видим, что при работе ГПУ с отпуском теплоты КИТТ нетто на 100...45 % выше, чем при работе без отпуски теплоты. При этом КИТТ нетто сильно зависит от степени сжатия в компрессоре и температуры за камерой сгорания. При низкой температуре газов КИТТ резко падает с ростом степени сжатия. С ростом температуры газов за камерой сгорания КИТТ падает медленно в широком диапазоне степени сжатия в компрессоре.

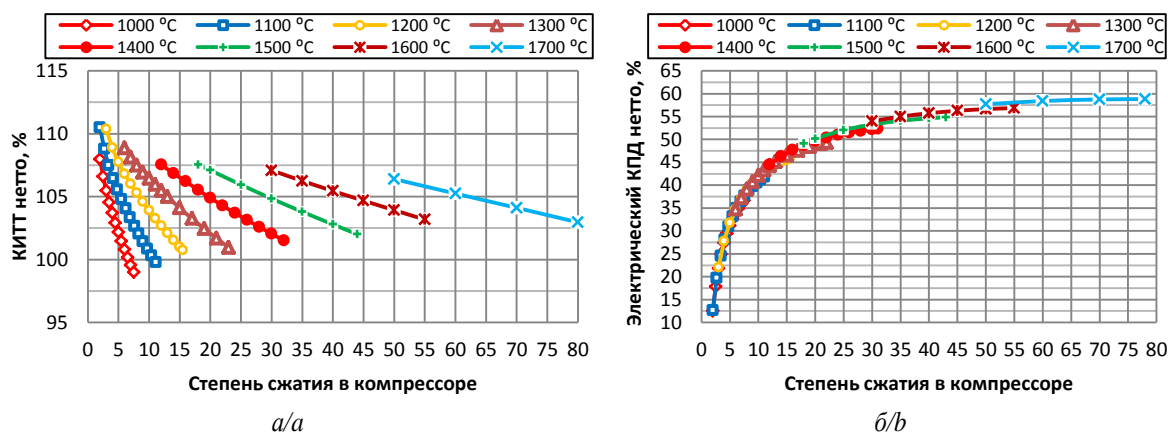
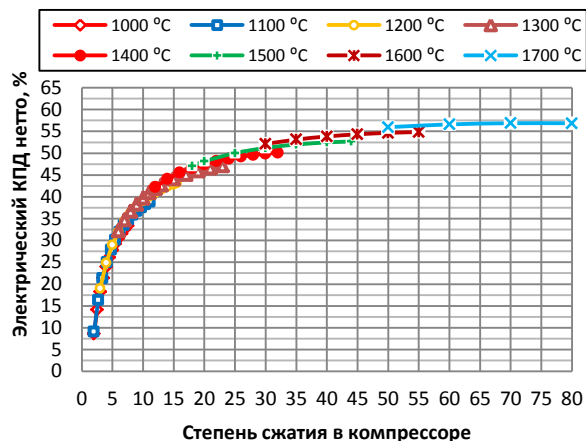


Рис. 6. Зависимость КИТТ нетто и КПД нетто от степени сжатия в компрессоре и температуры на выходе камеры сгорания: а) КИТТ нетто ГПУ с отпуском теплоты; б) КПД нетто ГПУ без отпуски теплоты

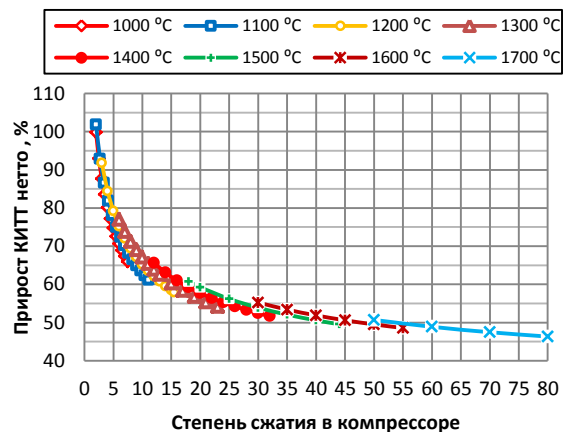
Fig. 6. Dependence of the net heat utilization factor of the fuel and net efficiency on the degree of compression in the compressor and the temperature at the outlet of the combustion chamber: а) net heat utilization factor of the fuel net gas turbine plant (GTU) with heat release; б) net efficiency of GTU without heat supply

На рис. 7, а представлена зависимость максимальных значений КПД нетто для ГПУ с отпуском теплоты. При этом видим, что КПД нетто на 5 % ниже при отпуске теплоты, чем без отпуска (рис. 6, б), что в основном связано с затратами электроэнергии на привод компрессора теплового насоса. На рис. 7, б при-

ведена зависимость прироста КИТТ нетто в схеме с отпуском теплоты по сравнению к КПД нетто (рис. 7, а). Эти зависимости показывают, что при низкой степени сжатия в компрессоре и температуре за камерой сгорания основная доля сжигаемого топлива идет на отпуск теплоты.



а/а



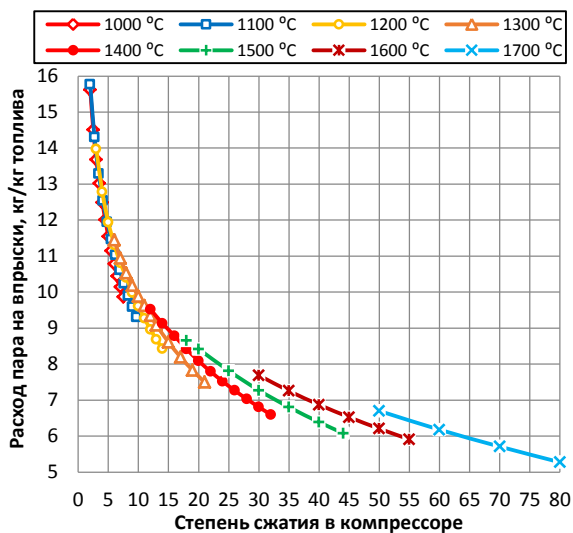
б/б

Рис. 7. а) электрический КПД нетто в схеме с отпуском теплоты; б) прирост КИТТ нетто в схеме с отпуском теплоты

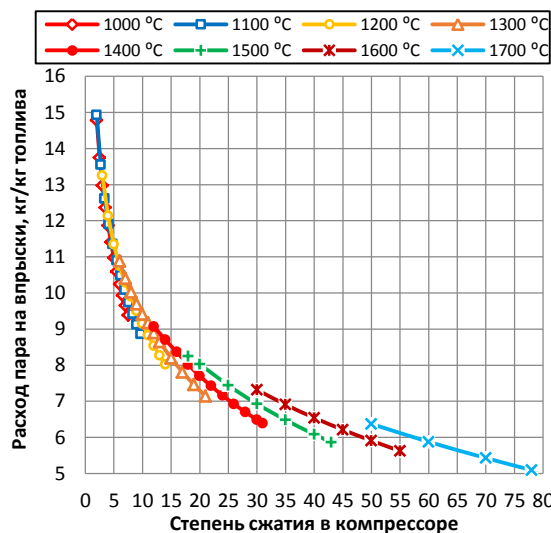
Fig. 7. а) net electrical efficiency in a scheme with heat release; б) increase in the net heat utilization factor of the fuel net in the scheme with heat supply

Расход пара на экологический и энергетический впрыски и на охлаждение турбины сильно зависит от степени сжатия в компрессоре и температуры газов на выходе КС (рис. 8). С их ростом он суще-

ственно снижается. При работе ГПУ с отпуском теплоты (рис. 8, а) расход пара на впрыски примерно на 0,5 кг на 1 кг топлива выше, чем без отпуска (рис. 8, б).



а/а



б/б

Рис. 8. Зависимость расхода энергетического пара ГПУ от степени сжатия в компрессоре и температуры газов на выходе КС: а) ГПУ с отпуском теплоты; б) ГПУ без отпуска теплоты

Fig. 8. Dependence of the power steam flow rate of the GTU on the compression ratio in the compressor and the temperature of the gases at the outlet of the compressor station: а) GTU with heat release; б) GTU without heat release

На рис. 9, а приведена зависимость удельной тепловой нагрузки потребителя теплоты от степени сжатия в компрессоре и температуры газов на выходе КС. Эта зависимость показывает, что с ростом степени

сжатия в компрессоре и температуры газов на выходе КС удельная тепловая нагрузка падает с 51 МДж/кг топлива при степени сжатия 2,5 и температуре газов на выходе КС 1000 °С до 23 МДж/кг топлива при сте-

пени сжатия 80 и температуре газов на выходе КС 1700 °С, примерно в 2 раза. При этом сильное падение происходит до степени сжатия 20.

На рис. 9, б приведена зависимость избыточного расхода конденсата при работе ГПУ с утилизацией теплоты и влаги и отпуском теплоты потребителю. Из рис. 9, б

видим, что при температурах на выходе КС выше 1200 °С всегда будет избыточный конденсат, который можно полезно использовать на станции. При этом расход избыточного конденсата сильно зависит от степени сжатия в компрессоре, уменьшаясь с ее ростом в 2...6 раз в зависимости от температуры газов на выходе КС.

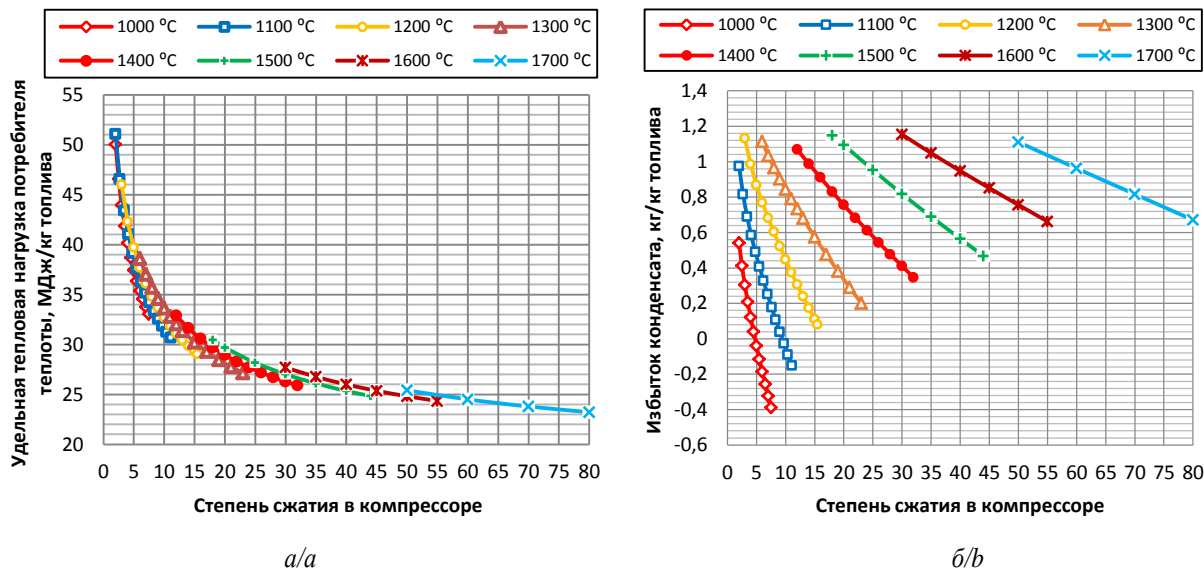


Рис. 9. а) зависимость удельной тепловой нагрузки потребителя в схеме с отпуском теплоты от степени сжатия в компрессоре и температуры газов на выходе КС; б) избыток конденсата, получаемого в КТАНе, относительно расхода воды на впрыски в схеме с отпуском теплоты

Fig. 9. а) dependence of the specific heat load of the consumer in the scheme with the release of heat on the compression degree in the compressor and the temperature of the gases at the outlet of the compressor station; б) excess of condensate obtained in contact heat exchanger with active packing, relative to the water consumption for injection in the scheme with heat release

Выводы

1. Разработана схема газопаровой установки с впрыском пара в камеру сгорания для снижения образования оксидов азота и увеличения мощности турбин, в которой для снижения потери теплоты с уходящими газами и сокращения выброса влаги в атмосферу в котел-утилизатор введен утилизатор теплоты и влаги из продуктов сгорания, а для использования полученной в теплоутилизаторе теплоты в системе теплоснабжения в схему введен тепловой насос, который служит для подогрева сетевой воды в конденсаторе и снижения температуры охлаждающей воды на входе теплоутилизатора в испарителе.
2. Разработан алгоритм расчета параметров работы предложенной схемы. Проведенный анализ по данному алгоритму показал, что:
 - при расчете по низшей теплоте сгорания топлива коэффициент использования теплоты топлива нетто находится в пределах 98...111 %, это на 100...45 % выше, чем при работе газопаровой установки без отпуска теплоты при одинаковых исходных параметрах;
 - в летнем режиме отпуска теплоты на горячее водоснабжение электрический КПД нетто на 5 % ниже, чем без отпуска, что в основном связано

с затратами электроэнергии на привод компрессора теплового насоса;

- расход впрыска пара в камеру сгорания и на охлаждение турбин сильно падает при росте степени сжатия в компрессоре до 20, примерно в 2 раза. При большей степени сжатия расход пара на впрыски снижается не больше 30 %. Отпуск теплоты увеличивает расход пара на впрыски на 0,5 кг на 1 кг топлива по сравнению с режимом без отпуска;
- удельная тепловая нагрузка потребителя теплоты падает с 51 МДж/кг топлива при степени сжатия 2,5 до 28 МДж/кг топлива при степени сжатия 20. Дальше падение происходит медленно до 23 МДж/кг топлива при степени сжатия 80;
- при работе газопаровой установки с утилизацией теплоты и влаги и отпуском теплоты потребителю при температурах на выходе камеры сгорания выше 1200 °С всегда будет избыточный конденсат, который можно полезно использовать на станции. Расход избыточного конденсата сильно зависит от степени сжатия в компрессоре, уменьшаясь с ее ростом в 2...6 раз в зависимости от температуры газов на выходе камеры сгорания.

3. На основе проведенных расчетов можно сделать вывод, что применение данной схемы наиболее выгодно при степени сжатия в компрессоре от 20 до 80 и температуре на выходе камеры сгорания 1400...1700 °С, при этом коэффициент использова-

ния теплоты топлива нетто будет 102...107 %; электрический КПД нетто 50...58 %; расход впрыска пара 5,5...8,5 кг/кг топлива; избыток уловленного конденсата 0,2...1,2 кг/кг топлива; удельная тепловая нагрузка потребителя теплоты 23...28 МДж/кг топлива.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Энергетическая стратегия России на период до 2035 года. Утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 09.06.2020 № 1523-р. – 93 с.
2. Манушин Э.А. Комбинированные энергетические установки с паровыми и газовыми турбинами. – М.: ВИНТИ, 1990. – 184 с.
3. Ol'khovskii G.G. Combined cycle plants: yesterday, today, and tomorrow (review) // Thermal Engineering. – 2016. – V. 63 (7). – P. 488–494.
4. Зысин В.А. Комбинированные и парогазовые установки и циклы. – М.; Л.: ГЭИ, 1962. – 186 с.
5. Арсеньев Л.В., Тырышкин В.Г. Комбинированные установки с газовыми турбинами. – Л.: Машиностроение, 1982. – 247 с.
6. Digumarthi R., Chung-Nan Chang. Cheng-cycle implementation on small gas turbine engine // Gas Turbine World. – 1984. – № 3. – P. 34–37.
7. Батенин В.М., Зейгарник Ю.А., Копелев С.З. Парогазовая установка с вводом пара в газовую турбину – перспективное направление развития энергетических установок // Теплоэнергетика. – 1993. – № 10. – С. 46–52.
8. Влияние расхода охлаждающего пара на характеристики парогазовых установок с впрыском пара / В.Е. Беляев, Д.В. Листопадов, А.С. Косой, А.П. Маркелов, М.В. Синкевич // Теплоэнергетика. – 2002. – № 9. – С. 47–51.
9. Influence of water injection on performance of scramjet engine / Yuefei Xiong, Jiang Qin, Kunlin Cheng, Youyin Wang // Energy. – 2020. – V. 201. – P. 117477–117490.
10. Efficiency boosting and steam saving for a steam-injected gas turbine engine: optimization study of the running conditions / A.M. Abubaker, A. Darwish Ahmad, M.N.A. Magableh, Y.S.H. Najjar // Journal of Energy Engineering – ASCE. – 2021. – V. 147 (1). – P. 732–748.
11. Techno-economic comparison of combined cycle gas turbines with advanced membrane configuration and MEA solvent at part load conditions / M. van Der Spek, D. Bonalumi, G. Manzolini, A. Ramirez, A.P.C. Faaij // Energy and Fuels. – 2018. – V. 32 (1). – P. 625–645.
12. Steam injected Humphrey cycle for gas turbines with pressure gain combustion / P. Stathopoulos, T. Rähse, J. Vinkeloe, N. Djordjevic // Energy. – 2019. – V. 188. – P. 116020.
13. On energy, exergy, and environmental aspects of a combined gas-steam cycle for heat and power generation undergoing a process of retrofitting by steam injection / P. Ziolkowski, T. Kowalczyk, M. Lemański, J. Badur // Energy Conversion and Management. – 2019. – V. 192. – P. 374–384.
14. Тачтон Дж. Полуэмпирический метод расчета содержания NOx в продуктах сгорания при наличии впрыска пара // Энергетические машины и установки. – 1984. – № 4. – С. 89–98.
15. Гордин К.А., Масленников В.М., Филимонова Е.А. Оценка уровня эмиссии оксидов азота при подаче пара с природным газом в камеру сгорания газотурбинной установки // Теплофизика высоких температур. – 2013. – Т. 51. – № 6. – С. 937–944.
16. Generation characteristics of thermal NOx in a double-swirler annular combustor under various inlet conditions / Zaiguo Fu, Huanhuan Gao, Zhuoxiong Zeng, Jiang Liu, Qunzhi Zhu // Energy. – 2020. – V. 200. – P. 117487–117501.
17. Farokhipour A., Hamidpour E., Amani E. A numerical study of NOx reduction by water spray injection in gas turbine combustion chambers // Fuel. – 2018. – V. 212. – P. 173–186.
18. Колп Д.А., Меллер Д.Ж. Ввод в эксплуатацию первой в мире газотурбинной установки полного цикла STIG на базе газогенератора LM 5000 (фирма Simpson Paper Company) // Современное машиностроение. Сер. А. – 1989. – № 11. – С. 1–14.
19. Меллер Д.Ж. Разработка, монтаж и испытание системы впрыска пара (STIG) в газогенератор LM 5000 фирмы General Electric // Современное машиностроение. Сер. А. – 1988. – № 2. – С. 11–17.
20. Дикий Н.А. Судовые газотурбинные установки. – Л.: Судостроение, 1978. – 264 с.
21. Романов В.Л., Кривуца В.А. Комбинированная газопаротурбинная установка мощностью 16–25 МВт с утилизацией тепла отходящих газов и регенерацией воды из парогазового потока // Теплоэнергетика. – 1996. – № 4. – С. 37–40.
22. Парогазовая установка для комбинированной выработки электроэнергии, тепла и холода (тригенерация) / В.М. Батенин, В.М. Масленников, Ю.А. Выскубенко, Э.А. Цалко, В.Я. Штеренберг // Теплофизика высоких температур. – 2014. – Т. 14. – № 6. – С. 934–940.
23. Efficiency of utilization of heat of moisture from exhaust gases of heat HRSG of CCGT / N. Galashov, S. Tsibulskiy, D. Mel'nikov, A. Kiselev, A. Gabdullina // MATEC Web of Conferences. – Tomsk, 2017. – P. 01027–01031.
24. Mokhtari H., Ahmadisedigh H., Ameri M. The optimal design and 4E analysis of double pressure HRSG utilizing steam injection for Damavand power plant // Energy. – 2017. – V. 118. – P. 399–413.
25. Numerical and experimental investigation of flue gases heat recovery via condensing heat exchanger / A. Macháčkova, R. Kocich, M. Bojko, L. Kunčická, K. Polko // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2018. – V. 124. – P. 1321–1333.
26. Параметрический анализ схемы газопаровой установки с помощью математической модели / Н.Н. Галашов, А.А. Туболев, А.А. Минор, А.И. Баннова // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 12. – С. 124–135.

Поступила: 28.02.2022 г.

Информация об авторах

Галашов Н.Н., кандидат технических наук, доцент НОЦ И.Н. Бутакова Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Туболев А.А., ассистент НОЦ И.Н. Бутакова Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Беспалов В.В., кандидат технических наук, доцент НОЦ И.Н. Бутакова Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Минор А.А., аспирант НОЦ И.Н. Бутакова Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Болдушевский Е.С., аспирант НОЦ И.Н. Бутакова Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 621.311.238; 621.311.22

CALCULATION OF THE PARAMETERS OF THE SCHEME OF A GAS-STEAM PLANT WITH DEEP UTILIZATION AND HEAT RELEASE

Nikolay N. Galashov,
gal@tpu.ru

Alexander A. Tubolev,
Tubolev@tpu.ru

Viktor V. Bespalov,
vic@tpu.ru

Alexander A. Minor,
aam29061994@gmail.com

Evgeny S. Boldushevsky,
franky575@rambler.ru

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

The relevance of the work is conditioned by the improvement of thermal schemes and optimization of the parameters of gas-steam installations in order to reduce the consumption of such energy resource as natural gas in the production of electricity and the release of heat. The proposals for improving the schemes of gas-steam plants supported by calculations, will increase their fuel heat utilization factor and reduce the amount of environmentally harmful emissions into the environment.

Purpose: development of a method for calculating the thermal schemes of gas-steam installations in order to improve their scheme based on a versatile parametric analysis and selection of optimal parameters and operating modes.

Objects: gas-steam plants with the release of electricity and heat based on gas turbines with steam injection into the combustion chamber, and deep utilization of heat and moisture from combustion products.

Methods: numerical research methods based on material and energy balances of systems and elements of gas-steam installations.

Results. The authors developed the method for calculating the thermal scheme of a gas-steam plant with the release of electricity and heat, and deep utilization of heat and moisture from combustion products. It was determined that heat and moisture introduction into the heat exchanger circuit makes it possible to lower the temperature of the combustion products leaving the heat exchanger to 15...45 °C, and also to capture up to 90...120 % of moisture from them. To reduce the temperature of the cooling water at the inlet to the heat and moisture exchanger, a heat pump was introduced into the circuit, which also makes it possible to increase the temperature of the network water in the heat supply system. The new scheme, due to a significant reduction in heat loss with exhaust gases, makes it possible to increase the fuel heat utilization factor by 45...100 % compared to the scheme without heat release when calculating the net calorific value of the fuel. It was found that the use of this scheme is most beneficial when the compression ratio in the compressor is from 20 to 80 and the temperature at the outlet of the combustion chamber is 1400...1700 °C, while the net heat utilization factor of the fuel will be 102...107 %; net efficiency 50...58 %; steam injection consumption 5,5...8,5 kg/kg of fuel; excess of captured condensate 0,2...1,2 kg/kg of fuel; specific heat load of heat consumer 23...28 MJ/kg of fuel.

Key words:

Gas turbine plant, gas steam plant, steam injection, waste heat boiler, combustion products, heat recovery unit, heat pump.

REFERENCES

1. *Energeticheskaya strategiya Rossii na period do 2035 goda* [Energy strategy of Russia for the period up to 2035]. Approved by the order of the Government of the Russian Federation, 09.06.2020. Vol. (1523-r).
2. Manushin E.A. *Kombinirovannye energeticheskie ustanovki s parovymi i gazovymi turbinami* [Combined energy installations with gas-steam turbines]. Moscow, VINITI Publ., 1990. 184 p.
3. Ol'khovskii G.G. Combined cycle plants: yesterday, today, and tomorrow (review). *Thermal Engineering*, 2016, vol. 63 (7), pp. 488–494.
4. Zysin V.A. *Kombinirovannye i parogazovye ustanovki i tsikly* [Combined and combined-cycle gas installations and cycles]. Moscow, Leningrad, GEI Publ., 1962. 186 p.
5. Arsenyev L.V., Tyryshkin V.G. *Kombinirovannye ustanovki s gazovymi turbinami* [Combined installations with gas turbines]. St-Petersburg, Mashinostroenie Publ., 1982. 247 p.
6. Digumarthi R., Chung-Nan Chang. Cheng-cycle implementation on small gas turbine engine. *Gas Turbine World*, 1984, vol. 3, pp. 34–37.
7. Batenin V.M., Zeygarnik Yu.A., Kopelev S.Z. Parogazovaya ustanovka s vvodom para v gazovuyu turbinu – perspektivnoe napravlenie razvitiya energeticheskikh ustanovok [Combined-cycle plant with steam injection into a gas turbine – a promising direction in the development of power plants]. *Teploenergetika*, 1993, no. 10, pp. 46–52.
8. Belyaev V.E., Listopadov D.V., Kosoy A.S., Markelov A.P., Senkevich M.V. Influence of cooling steam consumption on the characteristics of steam-gas installations with steam injection. *Teploenergetika*, 2002, no. 9, pp. 47–51. In Rus.
9. Yuefei Xiong, Jiang Qin, Kunlin Cheng, Youyin Wang. Influence of water injection on performance of scramjet engine. *Energy*, 2020, vol. 201, pp. 117477–117490.
10. Abubaker A.M., Darwish Ahmad A., Magableh M.N.A., Najjar Y.S.H. Efficiency boosting and steam saving for a steam-injected gas turbine engine: optimization study of the running conditions. *Journal of Energy Engineering – ASCE*, 2021, vol. 147 (1), pp. 732–748.
11. Van Der Spek M., Bonalumi D., Manzolini G., Ramirez A., Faaij A.P.C. Techno-economic comparison of combined cycle gas turbines with advanced membrane configuration and MEA solvent

- at part load conditions. *Energy and Fuels*, 2018, vol. 32 (1), pp. 625–645.
12. Stathopoulos P., Rähse T., Vinkeloe J., Djordjevic N. Steam injected Humphrey cycle for gas turbines with pressure gain combustion. *Energy*, 2019, vol. 188, p. 116020.
 13. Ziolkowski P., Kowalczyk T., Lemański M., Badur J. On energy, exergy, and environmental aspects of a combined gas-steam cycle for heat and power generation undergoing a process of retrofitting by steam injection. *Energy Conversion with Control and Management*, 2019, vol. 192, pp. 374–384.
 14. Tachton Dzh. Poluempiricheskiy metod rascheta sodержaniya NOx v produktakh sgoraniya pri nalichii vpryska para [Semi-empirical method for calculating the NOx content in combustion products in the presence of steam injection]. *Energeticheskie mashiny i ustanovki*, 1984, no. 4, pp. 89–98.
 15. Gordin K.A., Maslennikov V.M., Filimonova E.A.. Assessment of the emission level of nitrogen oxides when steam with natural gas is supplied to the combustion chamber of a gas turbine installation. *Thermophysics of high temperatures*, 2013, vol. 51, no. 6, pp. 937–944.
 16. Zaiguo Fu, Huanhuan Gao, Zhuoxiong Zeng, Jiang Liu, Qunzhi Zhu. Generation characteristics of thermal NOx in a double-swirler annular combustor under various inlet conditions. *Energy*, 2020, vol. 200, pp. 117487–117501.
 17. Farokhipour A., Hamidpour E., Amani E. A numerical study of NOx reduction by water spray injection in gas turbine combustion chambers. *Fuel*, 2018, vol. 212, pp. 173–186.
 18. Kolp D.A., Meller D.Zh. Vvod v ekspluatatsiyu pervoy v mire gazoturbinnoy ustanovki polnogo tsikla STIG na baze gazogeneratora LM 5000 (firma Simpson Paper Company) [Commissioning of the world's first full-cycle gas turbine STIG based on the LM 5000 gas generator (Simpson Paper Company)]. *Sovremennoe mashinostroyeniye. Seriya: A*, 1989, no. 11, pp. 1–14.
 19. Meller D.Zh. Razrabotka, montazh i ispytaniye sistemy vpryska para (STIG) v gazogenerator LM 5000 firmy General Electric [Development, installation and testing of the steam injection system (STIG) in the LM 5000 gas generator from General Electric]. *Sovremennoe mashinostroyeniye. Seriya: A*, 1988, no. 2, pp. 11–17.
 20. Dikiy N.A. *Sudovye gazoturbinnyye ustanovki* [Marine gas turbine installations]. St-Petersburg, Sudostroeniye Publ., 1978. 264 p.
 21. Romanov V.L., Krivutsa V.A. Kombinirovannaya gazoparoturbinnaya ustanovka moshchnostyu 16–25 MVt s utilizatsiyey tepla otkhodyashchikh gazov i regeneratsiyey vody iz parogazovogo potoka [Combined gas-steam turbine plant with a capacity of 16–25 MW with waste gas heat recovery and water regeneration from a steam-gas flow]. *Teploenergetika*, 1996, no. 4, pp. 37–40.
 22. Batenin V.M., Maslennikov V.M., Vyskubenko Yu.A., Tsalko E.A., Shterenberg V.Ya. Combined cycle gas plant for combined power generation, heat and cold (trigeneration). *Thermophysics of high temperatures*, 2014, vol. 14, no. 6, pp. 934–940. In Rus.
 23. Galashov N., Tsibulskiy S., Mel'nikov D., Kiselev A., Gabdullina A. Efficiency of utilization of heat of moisture from exhaust gases of heat HRSG of CCGT. *MATEC Web of Conferences*. Tomsk, 2017. pp. 01027–01031.
 24. Mokhtari H., Ahmadsedigh H., Ameri M. The optimal design and 4E analysis of double pressure HRSG utilizing steam injection for Damavand power. *Energy*, 2017, vol. 118, pp. 399–413.
 25. Macháčková A., Kocich R., Bojko M., Kunčická L., Polko K. Numerical and experimental investigation of flue gases heat recovery via condensing heat exchanger. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018, vol. 124, pp. 1321–1333.
 26. Galashov N.N., Tupolev A.A., Minor A.A., Bannova A.I. Parametric analysis of the gas-steam installation scheme using a mathematical model. *Proceedings of Tomsk Polytechnic University. Georesource engineering*, 2021, vol. 332, no. 12, pp. 124–135. In Rus.

Received: 28 February 2022.

Information about the authors

Nikolay N. Galashov, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Alexander A. Tubolev, assistant, National Research Tomsk Polytechnic University.

Viktor V. Bespalov, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Alexander A. Minor, postgraduate, National Research Tomsk Polytechnic University.

Evgeny S. Boldushevsky, postgraduate, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 556.314

РАСТВОРЕННЫЕ ФОРМЫ МИГРАЦИИ ГУМУСОВЫХ КИСЛОТ В ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОДНЫХ ОБЪЕКТАХ ЯМАЛО-НЕНЕЦКОГО АВТОНОМНОГО ОКРУГА

Лепокурова Олеся Евгеньевна^{1,2},
LepokurovaOY@ipgg.sbras.ru

Иванова Ирина Сергеевна¹,
ivanovais_1986@mail.ru

Трифонов Николай Сергеевич¹,
TrifonovNS@ipgg.sbras.ru

Колубаева Юлия Викторовна¹,
Kolubaeva@inbox.ru

Соколов Денис Александрович^{1,3},
Sokolovdenis@mail.ru

¹ Томский филиал Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, Россия, 634055, г. Томск, пр. Академический, 4.

² Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

³ Институт почвоведения и агрохимии СО РАН, Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 8/2.

Актуальность. Речные и озерные воды арктических районов Западной Сибири обогащены растворенными органическими веществами, прежде всего гумусовыми кислотами. Последние, как известно, характеризуются хорошей способностью образовывать устойчивые органоминеральные комплексы. При изучении формирования состава таких вод необходимо учитывать комплексные соединения, которые смещают равновесия в геохимических процессах (в растворении, выщелачивании, осаждении и соосаждении и др.) в сторону водной фазы, тем самым непосредственно влияя на состав вод. В случае гумусовых кислот накоплено достаточное количество термодинамических констант, что позволило полноценно провести численное моделирование.

Цель: рассмотреть особенности распространения гумусовых кислот (фульво- и гуминовых кислот) в поверхностных водах региона и провести расчеты форм их миграции на основе имеющихся новых данных по химическому составу; изучить, в каком количестве и какие элементы связываются гумусовыми кислотами; есть ли отличия между различными водными объектами, относящимися к разным речным бассейнам; в конечном счете определить роль органического вещества, главным образом гумусовых кислот, в формировании химического состава вод.

Объекты: поверхностные водные объекты тундровой и лесотундровой природных зон Ямало-Ненецкого автономного округа. Авторы постарались охватить основные стадии эволюции поверхностных вод в направлении просадка – крупные озера – реки, а также рассмотреть водные объекты разных водосборных бассейнов четырех основных рек – Таз, Пур, Обь, Надым. В итоге изучены 23 водотока (крупные и мелкие реки) и 24 водоема (20 озер разных размеров и 7 просадок).

Методы: химический состав воды определялся стандартными методами в Проблемной научно-исследовательской лаборатории гидрогеохимии Томского политехнического университета, определение фульвокислот и гуминовых кислот проводилось методом титрования по учету бихромата, расходуемого на окисление углерода фульвогуминовых кислот. Формы миграции гумусовых кислот и химических элементов рассчитывались с использованием программного комплекса HydroGeo.

Результаты. Изучены особенности распределения гумусовых кислот в направлении просадка–озеро–река основных водосборных бассейнов рек севера Западной Сибири. Впервые путем термодинамических расчетов определены растворенные миграционные формы гумусовых кислот относительно их концентраций, а также формы миграции основных ионов и микрокомпонентов с учетом содержания гумусовых кислот, то есть показано, какая их часть связывается в органоминеральные комплексы. Установлено, что соединения с фульвогуминовыми кислотами самые распространенные во всех описываемых водах, но максимальная их доля характерна для просадок. Определен ряд микроэлементов, максимально образующих органоминеральные формы: Cu, Ni, Mn, Li, Zn, Fe. Фульвокислоты более подвержены комплексообразованию. Полученные закономерности необходимо учитывать при рассмотрении условий формирования данных вод.

Ключевые слова:

Растворенные формы миграции, термодинамическое моделирование, гумусовые кислоты, органоминеральные комплексы, поверхностные воды, арктические районы, Ямало-Ненецкий автономный округ.

Введение

Многочисленные исследования показали [1–5], что природные воды северной части Западной Сибири обогащены растворенным органическим веще-

ством (РОВ) при общем низком содержании растворенных неорганических элементов (то есть низкой минерализации), за исключением в некоторых случаях железа, аммония [5], марганца, фосфора [3]. При

этом большая роль в формировании химического состава вод отводится органическому веществу (ОВ). В последнее время уделяется особое внимание органо-минеральным комплексам [6–9], как правило, при решении различных экологических задач [10–12]. Активный интерес при этом направлен именно на гумусовые кислоты, что связано с их доминирующим распространением в водах и, главное, с их способностью образовывать устойчивые комплексные соединения. При использовании в моделировании для таких соединений определены и накоплены константы устойчивости [13–16].

Авторы данной статьи в попытке определить роль ОВ в формировании химического состава вод поставили перед собой более узкую задачу – рассчитать, какие растворенные комплексные соединения образуют гумусовые кислоты и в каком количестве. В данной работе мы не рассматривали коллоидные и взвешенные формы миграций, хотя многими исследователями [6, 13, 17–21] отмечается в реках доминирование взвешенных форм нахождения металлов относительно растворенных. А некоторые утверждают, что по сравнению с другими реками мира воды рек Западной Сибири демонстрируют низкую взвешенную долю нерастворимых микроэлементов, предположительно из-за коллоидного переноса, благодаря высоким концентрациям железа и органических веществ [3, 22]. Можно также добавить, что гумусовые кислоты, соединяясь с основными ионами и микроэлементами, могут удерживать их в водной фазе и

тем самым способствовать их накоплению и перемещению. Поэтому так важно их рассматривать при изучении формирования состава вод.

Объект исследования, полевые и лабораторные работы

Район исследования приурочен к Арктической зоне Западной Сибири (рис. 1), административно располагается в пределах Ямало-Ненецкого автономного округа (ЯНАО). Особенности климата определяются близостью Карского моря, обилием заливов, рек, болот и озер. Территория относится к тундровой и лесотундровой природным зонам, характеризуется заболоченностью и широким распространением мощного слоя многолетнемерзлых пород. Глубина залегания многолетней мерзлоты на изученных участках составляет 50–85 см. Необходимо отметить, что в последние десятилетия ученые обеспокоены вопросами, касающимися потепления климата в Арктическом регионе и деградации вечной мерзлоты [23–26]. Территория исследования относится к верхнечетвертичным и среднечетвертичным равнинам морского, ледникового и ледниково-морского генезиса, представленным в основном среднесуглинистыми осадками, которые сменяются среднечетвертичными и верхнечетвертичными песчаными и супесчаными отложениями озерно-аллювиального и аллювиального генезиса. Почвенный покров в основном представлен торфяными, преимущественно олиготрофными, реже эутрофными почвами, имеющими мощные органогенные горизонты [27].

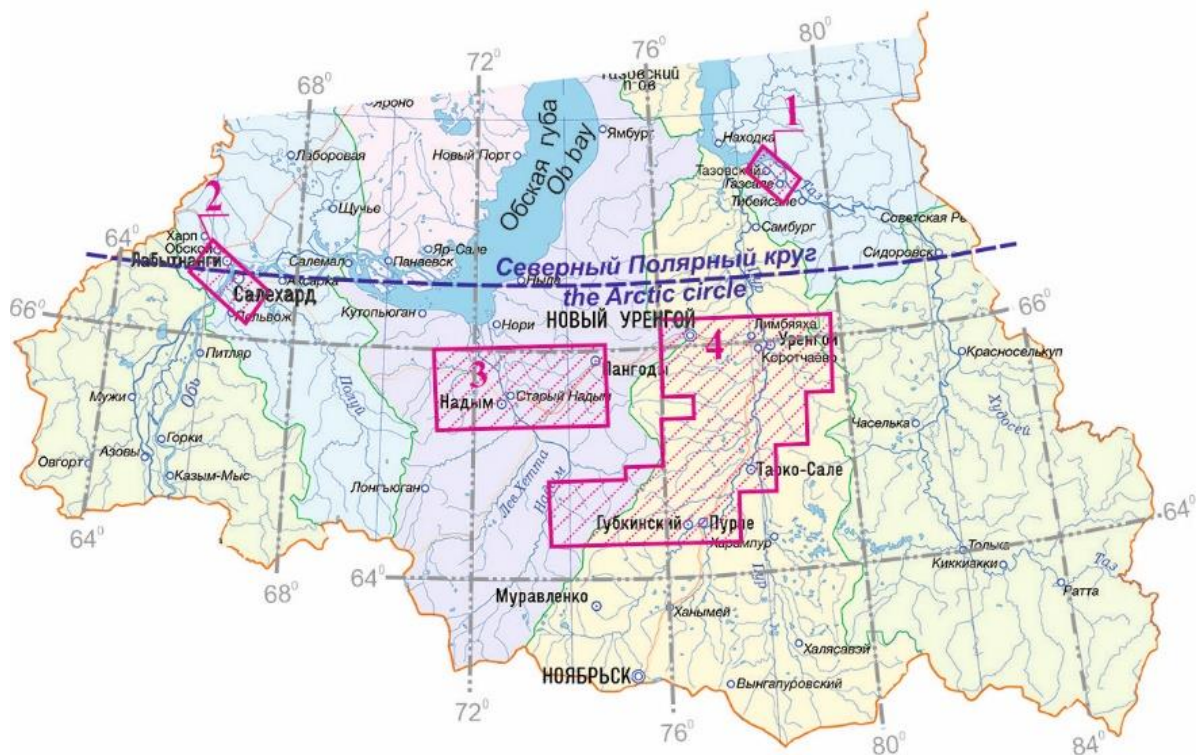


Рис. 1. Схема опробования поверхностных вод на территории ЯНАО в 2020 г. Опробованные водосборные бассейны (участки): 1 – р. Таз; 2 – р. Обь; 3 – р. Надым; 4 – р. Пур

Fig. 1. Scheme of testing surface waters on the territory of the Yamalo-Nenets Autonomous District in 2020. Tested catchment basins (sites): 1 – Taz river; 2 – Ob river; 3 – Nadym river; 4 – Pur river

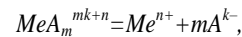
Более 17 % территории ЯНАО заняты водными объектами, в том числе озерами и болотами. Речная сеть насчитывает 48000 рек общей протяженностью около 291 тыс. км, большая часть которых относится к малым рекам и ручьям. Наиболее крупными реками являются Обь, Надым, Таз и Пур. Питание рек в основном происходит за счет осадков, преимущественно снеговых, в меньшей степени дождевых, а также за счет болотно-грунтовых вод. Густота речной сети составляет 0,38 км/км², а среднегоголетний речной сток составляет 581,3 км³/год [28]. Замедленный круговорот веществ в условиях низких температур и заболоченность водосборов способствуют накоплению в поверхностных водах широкого спектра органических веществ.

Экспедиционные работы на территории ЯНАО были проведены сотрудниками ТФ ИНГТ СО РАН в августе 2020 г. Основные пункты опробования – реки (как крупные, так и мелкие водотоки), озера и просадки (небольшие озера, образующиеся в результате просадки грунта в областях многолетней мерзлоты). Такое опробование позволило охватить все стадии эволюции поверхностных вод в системе просадка–озеро–река, начиная с просадки – начальной стадии образования термокарстовых озер [22]. В результате были заложены четыре ключевых участка исследования в соответствии с водосборами бассейнов крупных рек: Таз (№ 1), Обь (№ 2), Надым (№ 3), Пур (№ 4) (рис. 1). Всего было отобрано 47 проб природных вод: 23 из водотоков и 24 из водоемов (озерные воды и просадки).

В полевых условиях проводились измерения быстроменяющихся показателей: температуры, pH, Eh, электропроводности. Аналитические исследования проводились стандартными методами (титрование, масс-спектрометрия, фотометрия) в Проблемной научно-исследовательской лаборатории гидрогеохимии Томского политехнического университета. Химическое потребление кислорода (ХПК) определено фотометрическим методом (анализатор Флюорат 02-3М, Люмэкс). Значение перманганатной окисляемости (ПО) проанализировано титриметрическим методом. Содержание растворенного органического углерода (C_{орг}) проанализировано методом высокотемпературного каталитического окисления с использованием прибора Vario TOC cube (Elementar). Определение фульвокислот (ФК) и гуминовых кислот (ГК) проводилось методом титрования по учету бихромата, расходуемого на окисление углерода фульвогуминовых кислот (ФГК).

Расчетные методы исследования

Формы миграции гумусовых кислот рассчитывались методами равновесной термодинамики с использованием программного комплекса HydroGeo, разработанного М.Б. Букаты и сертифицированного в Росатомнадзоре [29]. Данный программный комплекс базируется на методе констант равновесий. Сама методика расчетов комплексообразования достаточно подробно изложена в книге [30]. Органоминеральные соединения образуются при взаимодействии иона-комплексообразователя (Me) и лигандов (A), в том числе и органического происхождения (ФК и ГК):



где $[Me^{n+}]$ – молярная концентрация элемента с зарядом n^+ в незакомплексированной форме; $[A^{k-}]$ – молярная концентрация лиганда A с зарядом k^- .

Характеристикой комплексного соединения служит константа устойчивости K_y :

$$K_y = \frac{[MeA_m^{mk+n}]}{[Me^{n+}][A^{k-}]^m},$$

где $[MeA_m^{mk+n}]$ – молярная концентрация комплексного соединения, имеющего суммарный заряд $mk+n$; m – координационное число.

Константы устойчивости соединений получают экспериментальным путем; существуют различные данные, в том числе и для гумусовых кислот. Для своих расчетов мы использовали константы комплексных соединений с ГК и ФК, выведенные для пресных поверхностных вод [13], обогащенных РОВ.

Входными параметрами модели были температура, pH, Eh, анионы (HCO_3^- , CO_3^{2-} , CO_2^- , SO_4^{2-} , Cl^-), катионы (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , $Fe^{2+,3+}$), микрокомпоненты (Li, Sr, Al, Si, Ba, Zn, Cr, Cd, Fe, Mn, Co, Ni, Cu, Br), концентрации ОВ (ГК и ФК), а также соединения NH_4^+ , NO_2^- , NO_3^- , PO_4^{3-} .

Краткая характеристика состава природных поверхностных вод территории

Краткие сведения по химическому составу вод и содержанию в них тяжелых металлов приведены в [31], частично данные вошли в [5]. Кратко приведем характеристику с учетом полученных концентраций по фульво- и гуминовым кислотам. В табл. 1 для экономии объема не расписаны катионы, анионы и микрокомпоненты, а только общие показатели и показатели растворенного ОВ. Последние для данной статьи более актуальны. Все данные разбиты на четыре участка в соответствии с водосборами бассейнов рек (в направлении с севера на юг): Таз (10 проб), Обь (12 проб), Надым (4 пробы), Пур (21 проба). Внутри каждого водосбора информация приведена в направлении просадка–озера–реки.

Все природные воды ультрапресные (от 2 до 140, при среднем 17 мг/л), лишь в двух точках значения минерализации превышают 100 мг/л (реки Малая Хадьрыха и Обь). Значения pH варьируют в широком диапазоне от 3,9 до 7,9, но преимущественно характерна слабокислая и нейтральная среда (от 5 до 6). Каких-то значимых различий между составом вод разных речных бассейнов не было обнаружено [5, 31]. А вот по типу водного объекта отличия очевидны.

Воды просадок (7 проб). Характеризуются самыми низкими значениями минерализации (от 2 до 35, при среднем 11 мг/л), кислой средой (3,9–5,9), самыми высокими концентрациями РОВ: Сорг от 12,2 до 95,2 мг/л, ХПК от 90 до 440 мгО₂/л, ПО от 9,8 до 168 мгО₂/л, ФГК (ФК+ГК) от 28,5 до 93,1 мг/л. В анионном составе преобладает сульфат-ион, в катионном – ион аммония. Данные воды уверенно можно назвать органогенными, как предлагал еще В.И. Вернадский, то есть это такие воды, где количество ОВ превышает общую минерализацию.

Таблица 1. Некоторые физико-химические показатели состава поверхностных вод ЯНАО

Table 1. Some physico-chemical indicators of the composition of surface waters of Yamalo-Nenets Autonomous District (YNAD)

Номер пробы Sample number	Место отбора, координаты Sampling point, coordinates	pH	Еh	TDS	Тип вод Type of water	Сорг DOC	XПК COD	ПО OD	ФК FA	ГК HA
		–	мВ mV	мг/л mg/L		мг/л mg/L	мгО ₂ /л mgO ₂ /L	мг/л mg/L		
Водосборный бассейн р. Таз/Catchment area of the Taz River										
984	просадка/depression	4,38	50	2	SO ₄ -Cl-NH ₄ -Ca	61,6	164,3	21,6	24,2	16,2
992	просадка/depression	5,22	300	7	Cl-HCO ₃ -NH ₄ -Ca	47,3	149,3	50,8	33,7	11,2
986	озеро/lake	4,50	300	4	SO ₄ -Ca-NH ₄ -Mg	27,9	114,5	14,4	17,2	9,3
989	озеро/lake	6,05	400	21	HCO ₃ -Ca-Na-Mg	13,3	43,5	10,8	3,6	8,5
991	озеро/lake	5,65	240	19	HCO ₃ -Ca-NH ₄	37,6	100,2	16	22,3	12,0
985	ручей/creek	6,10	500	14	HCO ₃ -Ca-Mg-Na	21,3	48,7	30,8	18,4	2,0
988	р. Вэсакаяха/Vesakayakha River	6,30	480	31	HCO ₃ -Ca-Na-Mg	18,1	48,1	18,4	11,7	5,0
993	р. Малая Хэяха Malaya Heyakha River	6,72	470	43	HCO ₃ -Ca-Na-Mg	14,6	39	9,6	9,5	4,1
990	р. Халытахоаяха Halytakhoayakha River	6,87	460	46	HCO ₃ -Ca-Na-Mg	7,2	25,7	3,2	4,2	1,8
983	р. Таз/Taz River	7,17	440	94	HCO ₃ -Ca-Mg	6,7	36,2	9,2	4,5	1,4
2. Водосборный бассейн р. Обь/Catchment area of the Ob River										
1015	просадка/depression	3,89	730	16	SO ₄ -NH ₄ -Ca	95,2	254	9,8	60,6	32,6
1016	просадка/depression	5,97	485	35	HCO ₃ -Ca-Na	37,1	120	37,6	23,1	12,4
1013	озеро/lake	5,96	480	11	HCO ₃ -Ca-Mg	8,7	26	7,2	2,8	4,2
1014	озеро/lake	5,63	525	7	HCO ₃ -Ca-Mg	17,9	45	23,2	12,3	4,1
1006	озеро/lake	6,40	420	24	HCO ₃ -Ca-Na	10,2	27,3	10,8	3,2	4,9
1007	озеро/lake	6,10	460	28	HCO ₃ -Ca-Mg	12,8	31	14,4	3,2	7,6
1032	оз. Кирилл-Выслор Lake Kirill-Vyslor	5,37	560	33	Cl-HCO ₃ -Na-Ca	6,2	19,3	3,7	2,0	2,9
1012	р. Нядаяха/Nyadayaha River	5,54	540	11	HCO ₃ -Ca-Mg	16,4	52	15,2	10,6	4,6
1009	ручей/creek	6,13	490	18	HCO ₃ -Mg-Ca-Na	26,3	98,5	18,4	19,2	5,4
1011	р. Васьюган/Vasyegan River	6,22	490	32	HCO ₃ -Na-Ca	9,2	24,7	9,6	5,6	2,4
1008	р. Ханмей/Khanmei River	7,25	435	37	HCO ₃ -Ca-Mg	4,6	12,3	3,2	2,2	1,0
1010	р. Обь/Ob River	7,85	405	130	HCO ₃ -Ca-Na	3,8	20,3	6,4	1,7	0,5
3. Водосборный бассейн р. Надым/Catchment area of the Nadym River										
1020	просадка/depression	5,06	600	7	SO ₄ -NH ₄	12,2	414	168	38,7	20,8
1019	озеро/lake	5,50	545	13	HCO ₃ -NH ₄ -Na	11,2	33,7	10,2	4	6
1018	р. Тьяха/Tyakha River	5,86	505	15	HCO ₃ -Ca-Na	10,3	26,8	11,4	6,1	2,6
1017	р. Маханыд Пусьяха Makhanyad Pusyakh River	6,6	450	68	HCO ₃ -Ca-Mg	3,2	4,6	3,0	1,6	0,7
4. Водосборный бассейн р. Пур/Catchment area of the Pur River										
1025	просадка/depression	3,93	105	3	SO ₄ -NH ₄	49,1	161	49,6	18,9	28,4
1031	просадка/depression	4,06	710	9	SO ₄ -NH ₄	30,1	90,3	33,6	18,5	10,1
1024	озеро/lake	4,10	320	2	SO ₄ NH ₄	40,8	126	44,8	27,4	11,7
1028	озеро/lake	4,44	680	7	SO ₄ -NH ₄	15,1	120	17,6	5,6	8,3
997	озеро/lake	5,27	560	12	HCO ₃ -Na	6,7	20,7	4,4	2	3
998	озеро/lake	5,96	210	17	HCO ₃ -Na	9,9	32,6	7,2	3,3	4,9
1001	озеро/lake	5,22	260	7	HCO ₃ -Na-Ca	6,6	17,7	5,6	2,2	3,3
1002	озеро/lake	5,42	550	10	HCO ₃ -NH ₄	44,2	118	23,2	17,0	25,6
995	озеро/lake	6,14	450	6	HCO ₃ -Ca-NH ₄	8,9	27,5	6,8	2,8	4,2
1023	озеро/lake	6,25	445	15	HCO ₃ -NH ₄ -Na	9,7	30,5	7,5	5,2	3,4
1026	р. Панкитьяха/Pankityakha River	4,35	690	24	SO ₄ -NH ₄ -Ca	23,6	96,5	11,8	15,8	6,8
1029	р. Апокуяха/Apokuyakha River	4,98	595	9	HCO ₃ -Na-NH ₄	12,0	32,5	13,1	7,4	3,2
1027	р. Пурле/Purle River	6,37	485	24	HCO ₃ -Na-Ca	9,5	26,7	9,1	5,9	2,5
994	р. Нгарка-Хадьтаяха Ngarka-Khadytayakha River	6,97	450	89	HCO ₃ -Na-Ca	16,7	44,5	14,4	10,8	4,6
996	р. Малая Хадьрьяха Malaya Khadyryakha River	6,99	470	140	HCO ₃ -Na-Ca	7,4	19,8	5,6	4,5	1,9
999	р. Лимбяха/Limbyaha River	6,08	500	19	HCO ₃ -Ca-Na	8,2	26,3	5,6	4,8	2,0
1000	р. Ямсовей/Yamsovey River	6,51	475	26	HCO ₃ -Ca-Na-Mg	5,7	15,2	4,0	3,4	1,4
1004	р. Аймальяха/Aimalyakha River	6,22	500	15	HCO ₃ -Ca-Na	8,9	20,2	8,96	5,3	2,3
1021	р. Седьяха/Sedyakha River	6,11	500	14	HCO ₃ -Ca-Mg	11,5	30,9	10,6	7,1	3,0
1022	р. Евояха/Evoyakha River	6,48	475	23	HCO ₃ -Ca-Na	5,3	14,2	6,7	3,0	1,3
1005	р. Пур/Pur River	5,52	540	19	HCO ₃ -Mg-NH ₄	15,4	82,6	28,8	10,8	3,2
Общее по всем участкам/General across all sites										
Среднее значение/Average		5,78	50	17	–	13,7	44,1	12,1	1,6	0,5
Минимальное значение/Minimum		3,89	730	2	–	3,2	4,6	3,0	60,5	32,6
Максимальное значение/Maximum		7,85	462	140	–	95,2	414	168	11,3	6,8

Речные воды (23 пробы). Характеризуются самыми высокими значениями минерализации для исследуемых вод (от 9 до 140, при среднем 41 мг/л), более высоким показателем pH, но с большими разбросами значений (от 4,1 до 7,8): ручьи и маленькие реки более кислые (4,1–6,0), большие водотоки более щелочные (6,0–7,8). Концентрации РОВ самые низкие: Сорг от 3,2 до 26,3 мг/л, ХПК от 4,6 до 98,5 мгО₂/л, ПО от 3,0 до 30,8 мгО₂/л, ФГК (ФК+ГК) от 2,2 до 24,6 мг/л. Среди анионов преобладает гидрокарбонат-ион, среди катионов – кальций, иногда натрий и магний.

Озерные воды (17 проб). Характеризуются промежуточными между водами просадок и речными водными значениями минерализации (от 2 до 33, при среднем 27 мг/л), pH (4,1–6,4), показателями РОВ: Сорг от 6,2 до 44,2 мг/л, ХПК от 17,7 до 126 мгО₂/л, ПО от 3,7 до 44,8 мгО₂/л, ФГК (ФК+ГК) от 4,9 до 12,4 мг/л. Анионы и катионы имеют сложный смешанный состав.

Более детально рассмотрим особенности распределения гумусовых кислот в водах. Гумусовые вещества попадают в водоемы в результате вымывания из почвы и торфов или в процессе разложения остатков растений, в том числе и водных. Почвенный гумус состоит из нерастворимой части гуминовых и фульвокислот. Гуминовые кислоты с молекулярной массой 1200–1500 и содержанием углерода 58 % могут образовывать в воде взвеси, коллоидные и истинные растворы [16, 32]. Фульвокислоты – это также высокомолекулярные соединения с массой 40000, содержат меньше углерода – 45–48 %, более диссоциированы и могут присутствовать в воде в коллоидном и истинно растворенном состоянии, их можно рассматривать либо как продукты разложения ГК, либо как их предшественников. При этом воды разных природно-климатических зон характеризуются различным соотношением ГК и ФК, определяемым спецификой почв [32, 33].

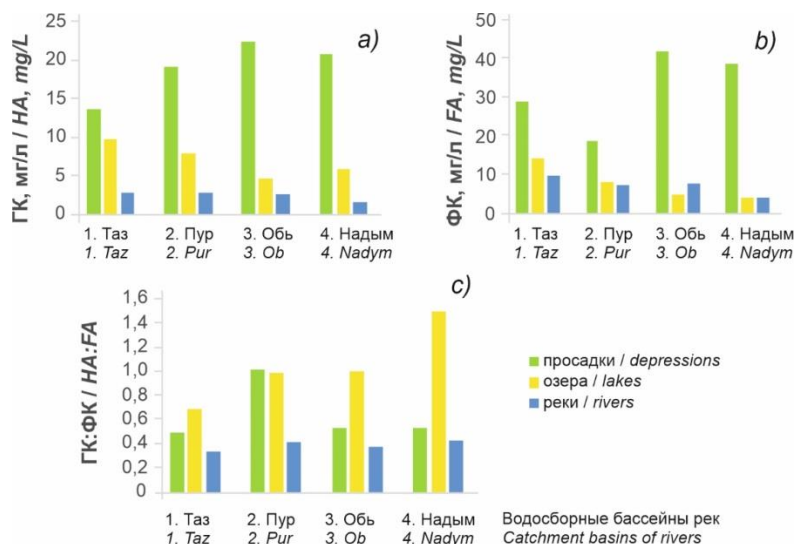


Рис. 2. Распределение в поверхностных водах ЯНАО: гуминовых кислот (а), фульвокислот (б) и отношения ГК:ФК (с)
Fig. 2. Distribution in the surface waters of the YNAD: humic acids (a), fulvic acids (b) and HA:FA ratio (c)

Среднее распределение ФГК в поверхностных водах ЯНАО наглядно можно увидеть на рис. 2. Кроме уже отмеченной закономерности уменьшения их концентраций в направлении просадка–озеро–река можно лишь сказать про большую контрастность такого изменения для водосборных бассейнов Оби и Надыма (рис. 2, a, b). Интереснее посмотреть отношение в водах ГК:ФК (рис. 2, c), которое меняется от 0,11 до 2,3 (в среднем 0,3–1,5) и в целом соответствует такому отношению в верхних горизонтах тундровых почв региона (0,2–0,9), приведенному в работах [32, 34]. Более высокие значения этого показателя в водах относительно почв могут свидетельствовать о влиянии мерзлых органогенных горизонтов почв, добавляющих при оттаивании гумус. Самое высокое отношение ГК:ФК при общем пониженном количестве ФГК в озерах соответствует холодным и влажным климатическим условиям, когда болота являются источником ГК, но биопродуктивность и скорость разложения ОБ низка. Низкие комбинации ГК:ФК при не-

больших их концентрациях в реках говорят о высокой степени разложения ОБ, что, в частности, подтверждается превалированием гидрокарбонат-иона в анионном составе вод.

Результаты и их обсуждение

Результаты расчетов форм миграции мы не стали группировать по разным водосборным бассейнам, поскольку сильных различий по составу вод не было выявлено. Более принципиально разделение по категориям просадка–озеро–река. В табл. 2 приведены формы миграции ФГК относительно их концентраций в водах. То есть показано, сколько в % расходуется имеющихся в водах ГК и на какие соединения. Но исследование было бы неполным без рассмотрения следующей задачи: сколько в % расходуется катионов (элементов) относительно своего содержания в водах, то есть какую их часть связывают ФГК. Такие результаты приведены в табл. 3, где для каждого иона показаны основные формы миграций (>1 %), включая и с ФГК.

Исходя из полученных расчетных данных, приведенных в табл. 2, можно сделать вывод о том, что фульвокислоты имеют большую способность к комплексообразованию по сравнению с гуминовыми кислотами. Как показали расчеты, они образуют пять соединений с основными катионами в значениях >1 %: NaФК^- , FeФК^0 , MgФК^0 , CaФК^0 , KФК^- , и еще восемь соединений с микрокомпонентами в значениях >0,1 %: AlФК^+ , $(\text{Fe}(\text{ФК})_2)^{2-}$, LiФК^- , $(\text{Cu}(\text{ФК})_2)^{2-}$, CuФК^0 , ZnФК^0 , NiФК^0 , MnФК^0 . При этом достаточно много мигрируют фульвокислоты в виде собственно $(\text{ФК})^{2-}$, в среднем 30–50 %. Гуминовые кислоты менее склонны к комплексообразованию, большей частью (от 50 до 99 %) мигрируют в свободном виде $(\text{ГК})^{2-}$. Для них характерно образование соединений только с магнием и кальцием. В нашем случае появляются еще соединения MnГК^0 , NiГК^0 , правда в небольших долях.

Более интересны, по нашему мнению, результаты, представленные в табл. 3. Основные катионы (Ca^{2+} , Na^+ , Mg^{2+} , K^+ , $\text{Fe}^{2+,3+}$), а также большинство микрокомпонен-

тов (Mn, Li, Ba, Ni, Zn, Sr, Cr), прежде всего, мигрируют в простой ионной форме. Самое распространенное комплексное соединение – с ФГК, чаще с ФК. При этом в некоторых случаях доля такого соединения достигает 10 % (Fe, Na), 30 % (Mn, Li), а такие элементы, как Ni и Cu, лучше мигрируют в комплексных соединениях с ФГК, чем в простой ионной форме. Таким образом, в сравнении с другими лигандами влияние гумусовых кислот в данных водах на миграцию элементов значительно.

Можно также отметить, что такие элементы, как железо, марганец и алюминий, образуют множество вариаций соединений, зависящих от различных изменений геохимической среды. Из-за большого объема информации невозможно было представить все полученные при расчетах формы миграции. Поэтому, например, соединение AlФК^+ попало в табл. 2 как возможное, а в табл. 3 уже указано, что Al не образует в значимых количествах формы с ФГК. Поскольку в пересчете на алюминий форма AlФК^+ в среднем для просадок соответствует всего 0,4 %.

Таблица 2. Результаты расчетов форм миграции ГК в природных водах ЯНАО (пределы содержания и среднее значение)

Table 2. Results of calculations of HA migration forms in the natural waters of the YNAD (limits of contents and average value)

Формы миграции/Migration forms	Просадки/Depressions (n=5)	Озера/Lakes (n=14)	Реки/Rivers (n=23)
Формы миграции с ФК, % от ФК/Migration forms with FA, % from FA			
$(\text{ФК})^{2-}/(\text{FA})^{2-}$	<u>17,8–41,8</u> 30,9	<u>13,5–71,7</u> 48,3	<u>6,0–56,9</u> 33,9
$\text{NaФК}^-/\text{NaFA}^-$	<u>1,5–55,1</u> 19,1	<u>11,5–81,1</u> 31,7	<u>40,7–81,2</u> 42,5
$\text{FeФК}^0/\text{FeFA}^0$	<u>6,7–75,5</u> 35,4	<u>0,1–15,2</u> 4,3	<u><0,1–15,5</u> 2,8
$\text{MgФК}^0/\text{MgFA}^0$	<u>0,5–34,9</u> 8,1	<u>1,1–11,0</u> 5,8	<u>2,3–34,9</u> 9,6
$\text{CaФК}^0/\text{CaFA}^0$	<u>0,5–3,7</u> 1,5	<u>0,8–15,9</u> 4,5	<u>1,2–18,1</u> 6,6
$\text{KФК}^-/\text{KFA}^-$	<u>0,4–6,3</u> 1,9	<u>0,3–7,8</u> 2,2	<u>0,11–5,66</u> 2,39
$\text{AlФК}^+/\text{AlFA}^+$	<u><0,1–3,5</u> 1,3	–	<u><0,01–0,99</u> 0,11
$(\text{Fe}(\text{ФК})_2)^{2-}/(\text{Fe}(\text{FA})_2)^{2-}$	<u>0,1–0,7</u> 0,4	–	–
$\text{LiФК}^-/\text{LiFA}^-$	<u>0,03–0,80</u> 0,33	<u>0,05–0,66</u> 0,34	<u>0,12–1,22</u> 0,51
$(\text{Cu}(\text{ФК})_2)^{2-}/(\text{Cu}(\text{FA})_2)^{2-}$	<u>0,07–0,23</u> 0,15	<u>0,02–2,35</u> 0,53	<u>0,01–1,14</u> 0,38
$\text{CuФК}^0/\text{CuFA}^0$	–	<u>0,01–4,27</u> 0,79	<u>0,03–2,88</u> 0,58
$\text{ZnФК}^0/\text{ZnFA}^0$	<u>0,06–0,27</u> 0,14	–	–
$\text{NiФК}^0/\text{NiFA}^0$	–	<u><0,01–0,52</u> 0,16	<u>0,01–0,81</u> 0,18
$\text{MnФК}^0/\text{MnFA}^0$	–	–	<u><0,01–0,51</u> 0,12
Формы миграции с ГК, % от ГК/Migration forms with HA, % from HA			
$(\text{ГК})^{2-}/(\text{HA})^{2-}$	<u>78,4–98,2</u> 90,2	<u>78,9–98,6</u> 89,1	<u>48,2–96,1</u> 76,9
$\text{MgГК}^0/\text{MgHA}^0$	<u>0,4–18,3</u> 4,8	<u>0,4–6,0</u> 3,2	<u>1,1–18,3</u> 7,2
$\text{CaГК}^0/\text{CaHA}^0$	<u>1,2–6,7</u> 3,8	<u>1,3–17,5</u> 7,1	<u>1,8–41,5</u> 15,3
$\text{MnГК}^0/\text{MnHA}^0$	<u>0,19–1,97</u> 1,01	<u><0,01–0,94</u> 0,38	<u>0,03–1,29</u> 0,33
$\text{NiГК}^0/\text{NiHA}^0$	<u>0,05–0,20</u> 0,13	<u>0,02–0,43</u> 0,13	<u>0,02–0,69</u> 0,18

Примечание. Приведены формы миграции, содержание которых: >1 % для основных катионов и >0,1 % для микрокомпонентов.

Note. The forms of migrations are given, the content of which is >1 % for basic cations, and >0,1 % for micro-components.

Таблица 3. Результаты расчетов форм миграции основных катионов и некоторых микроэлементов природных вод ЯНАО (пределы содержаний и среднее значение), % от валовых растворенных форм элемента

Table 3. Results of calculations of migration forms of basic cations and some trace elements of natural waters of the YNAD (limits of contents and average value), % of the gross dissolved forms of the element

Элемент Elements	Формы миграции Migration forms (>1 %)	Просадки/Depressions (n=5)	Озера/Lakes (n=14)	Реки/Rivers (n=23)
Ca ²⁺	Ca ²⁺	89,8–96,5 94,2	93,5–98,8 97,7	96,0–99,1 98,3
	CaФК ⁰ /CaFA ⁰	0,3–1,5 0,6	–	–
	CaГК ⁰ /CaHA ⁰	2,6–7,6 4,1	0,7–5,6 1,7	0,1–2,1 0,4
	CaSO ₄ ⁰	0,1–2,8 1,0	–	0,1–2,1 0,4
Na ⁺	Na ⁺	90,5–97,7 96,1	94,9–99,8 98,6	95,8–99,8 98,8
	NaFA ⁻	2,2–9,4 3,8	0,1–5,1 1,3	0,1–4,1 1,2
	(NaHPO ₄) ⁻	–	–	<0,1–9,7 2,8
Mg ²⁺	Mg ²⁺	92,9–97,9 95,8	96,1–99,3 98,5	96,0–99,3 98,6
	MgFA ⁰	0,5–2,2 0,9	<0,1–1,2 0,3	–
	MgSO ₄ ⁰	0,1–3,7 1,3	–	–
	MgHA ⁰	1,2–3,6 1,9	0,3–2,6 0,8	–
K ⁺	K ⁺	94,8–98,7 97,8	97,2–99,9 99,2	97,7–99,8 99,3
	KFA ⁻	1,2–5,2 2,1	0,1–2,7 0,7	<0,1–2,2 0,6
Fe ^{2+,3+}	Fe ²⁺	32,2–95,7 45,8	15,4–91,0 37,4	<0,1–43,3 11,2
	(Fe(OH) ₂) ⁺	<0,1–62,9 43,7	<0,1–77,1 47,0	2,5–69,9 42,1
	Fe(OH) ₃ ⁰	<0,1–18,3 4,3	<0,1–32,7 14,2	0,6–81,2 43,7
	Fe ³⁺	<0,1–9,8 3,7	–	<0,1–1,7 0,2
	FeFA ⁰	1,3–5,8 2,9	0,1–8,6 1,2	<0,1–1,5 0,4
	FeCl ⁺	–	<0,1–34,8 2,7	–
	(Fe(OH) ₄) ⁻	–	–	<0,1–26,6 2,6
Mn ²⁺	Mn ²⁺	64,8–84,6 78,6	73,4–95,2 90,0	70,7–97,0 92,5
	MnHA ⁰	12,5–30,2 18,1	3,8–24,2 8,5	0,2–7,1 3,3
	MnFA ⁰	1,0–3,8 1,7	0,1–2,6 0,7	<0,1–2,3 0,6
	MnSO ₄ ⁰	0,1–3,9 1,4	–	0,1–3,6 0,7
	MnCO ₃ ⁰	–	–	<0,1–24,5 1,8
	(MnHCO ₃) ⁺	–	–	<0,1–4,4 1,1
Li ⁺	Li ⁺	71,1–91,7 87,2	82,9–99,5 95,1	66,8–98,3 93,3
	LiFA ⁻	8,1–28,1 12,6	0,4–16,8 4,8	0,2–14,0 4,2
	Li ₂ CO ₃ ⁰	–	–	<0,1–32,5 2,6
Ba ²⁺	Ba ²⁺	96,6–99,5 98,1	98,6–99,7 99,3	98,1–99,5 98,5
	BaFA ⁰	0,4–1,7 0,7	<0,1–0,9 0,2	<0,1–0,7 0,2
	BaSO ₄ ⁰	0,1–3,0 1,1	0,1–0,6 0,2	0,1–2,2 0,5
Ni ²⁺	Ni ²⁺	18,7–43,6 35,7	36,1–77,2 59,5	40,6–90,0 68,6

	NiHA ⁰	<u>42,2–57,4</u> 49,3	<u>20,5–40,9</u> 31,8	<u>0,8–28,5</u> 15,1
	NiFA ⁰	<u>8,7–22,3</u> 13,6	<u>1,0–22,9</u> 7,4	<u>0,2–29,3</u> 8,8
	NiCO ₃ ⁰	–	–	<u><0,1–50,6</u> 4,3
	(NiHCO ₃) ⁺	–	–	<u><0,1–12,1</u> 2,9
Cu ²⁺	(Cu(FA) ₂) ²⁻	<u>48,3–81,7</u> 56,2	<u>2,2–69,5</u> 27,2	<u>0,2–66,6</u> 29,1
	CuFA ⁰	<u>16,2–43,1</u> 35,8	<u>27,9–63,1</u> 31,9	<u>5,6–70,9</u> 52,7
	CuHA ⁰	<u>2,1–12,7</u> 7,4	<u>2,3–42,8</u> 17,5	<u>0,5–17,5</u> 6,4
	Cu ²⁺	–	<u>0,2–13,1</u> 3,2	<u>0,3–12,5</u> 3,3
	CuCO ₃ ⁰	–	–	<u><0,1–89,6</u> 9,4
Zn ²⁺	Zn ²⁺	<u>74,3–92,1</u> 87,6	<u>85,6–98,9</u> 94,8	<u>67,5–98,2</u> 93,9
	ZnHA ⁰	<u>2,2–5,6</u> 3,3	<u>0,6–4,5</u> 1,5	<u><0,1–1,2</u> 0,5
	ZnFA ⁰	<u>5,1–19,1</u> 8,3	<u>0,3–11,8</u> 3,4	<u>0,1–9,8</u> 3,1
	ZnCO ₃ ⁰	–	–	<u><0,1–32,0</u> 2,2
Sr ²⁺	Sr ²⁺	<u>98,1–99,6</u> 98,6	<u>98,9–99,9</u> 99,6	<u>98,2–99,7</u> 99,3
	SrFA ⁰	<u>0,4–1,6</u> 0,6	<u><0,1–0,9</u> 0,2	<u><0,1–0,7</u> 0,2

Также установлено, что ионы Co³⁺, Cr²⁺, Al³⁺, Si⁴⁺ не образуют органоминеральные комплексы с ФК и ГК в значимых количествах и мигрируют в простых ионных формах (Cr²⁺), гидрохлоридных комплексах, гидроокислах и других формах ((Co₂(CO₃)₃)⁰, (Al₂(CO₃)₃)⁰, (AlHPO₄)⁺, (Al(HPO₄)₂)⁻, (AlOH)²⁺, (Al(OH)₂)⁺, (AlSO₄)⁺, Al(OH)₃⁰, (AlO₂)⁻, (AlO(OH)₂)⁻, (Al(OH)₄)⁻, (HSi₂O₆)³⁻).

Рассмотрим основные органоминеральные формы миграции ГК и химических элементов отдельно относительно каждого типа водного объекта.

Просадки. Ожидается для данных вод большое влияние ФК, поскольку концентрации ГК здесь превышают минерализацию иногда в десятки раз.

Если рассматривать относительно самих ГК (табл. 2), то это не так очевидно. Больше всего ФК в водах расходуется на соединения с железом, иногда до 75 %, в среднем 35,4 %. Затем следуют NaФК⁻ (в среднем 19 %), MgФК⁰ (8 %), KФК⁻ (1,9 %), CaФК⁰ (1,5 %). Достаточно активно, по сравнению с другими водами, мигрирует Al в форме AlФК⁺ (в среднем 1,3 %). Из микрокомпонентов: LiФК⁻, (Cu(ФК)₂)²⁻ и только в водах просадок появляется ZnФК⁰. ГК расходуются неактивно, предпочитая мигрировать в свободной ионной форме (в среднем 90 %), незначительно связываются с Mg (4,8 %) и Ca (3,8 %), из микрокомпонентов – с Mn и Ni.

Если рассматривать, сколько они связывают элементов, то по сравнению с реками и озерами для просадок наблюдаются максимальные результаты (табл. 3). ФК связывают в среднем (%): меди – 35,8; никеля – 22,3; лития – 12,6; цинка – 8,3; натрия – 3,8; железа – 2,9; калия – 2,1; марганца – 1,7. При этом ГК, несмотря на низкий процент их связываемости, иногда оказывают большее влияние на некоторые элементы, чем ФК. В среднем ГК связывает (%): ни-

келя – 49,3; марганца – 18,1; кальция – 4,1; цинка – 3,3; магния – 1,9.

В связи с особенным анионным составом вод появляются сульфатные формы для некоторых элементов, в частности для магния, марганца, бария.

Некоторые исследования в аналогичных низкоминерализованных и заболоченных водах также подтверждают наличие сульфатных форм, высокую степень связывания ГК с медью, цинком, марганцем, железом [35, 36], отсутствие такой связи в кислой среде с хромом и кобальтом [37].

Озера. Около 50 % ФК взаимодействуют с основными ионами, остальная половина мигрирует в виде (ФК)²⁻. Что касается микрокомпонентов, ФК образуют соединения с медью в форме (Cu(ФК)₂)²⁻ и CuФК⁰, литием в форме LiФК⁻ и никелем в форме NiФК⁰. Около 10 % ГК расходуются на формирование соединений с кальцием и магнием, и 0,5 % – с марганцем и никелем.

При этом ФК связывают в среднем (%): 79,1 меди; 7,4 никеля; 4,8 лития; 3,4 цинка; 1,3 натрия; 1,2 железа; остальных – менее 1. ГК связывают в среднем (%): 31,8 никеля; 17,5 меди; 8,5 марганца; 1,7 кальция; 1,5 цинка.

Воды озер арктических территорий России характеризуются тесной связью многих ионов металлов с содержанием ОБ [4, 6, 31]. Исследования по Западной Сибири подтверждают высокое сродство Cu, Ni, Zn, Fe к органическим лигандам гумусовой природы [4]. Для высокоминерализованных и более щелочных вод озер лесостепных и степных районов характерны в основном карбонатные формы миграции [38, 39].

Реки. Около 65 % фульвокислот взаимодействуют с основными ионами, чуть более 30 % мигрирует в виде собственно (ФК)²⁻. Из микрокомпонентов с ФК

взаимодействуют медь, литий, никель, марганец, алюминий (в сумме меньше 2 %). Чуть менее 25 % ГК расходуется на формирование соединений с кальцием, магнием, марганцем и никелем. В целом при повышении pH водной среды и снижении доли ФГК (просадка–озера–реки) количество хелатных комплексов уменьшается, что подтверждается и данными других авторов по рекам [8, 16, 40].

При этом ФК связывают в среднем (%): 81,8 меди; 8,8 никеля; 4,2 лития; 3,1 цинка; 1,2 натрия, остальных – менее 1. ГК связывают в среднем (%): 15,1 никеля; 6,4 меди; 3,3 марганца.

В связи с общим увеличением гидрокарбонат-иона иногда появляются карбонатные комплексы, в основном для микрокомпонентов: марганца, лития, никеля, меди, цинка, стронция. Макрокомпоненты не образуют карбонатные соединения из-за особенностей среды – она достаточно кислая ($pH < 7$). Например, для образования $CaCO_3$, $CaMg(CO_3)_2$ и $FeCO_3$ показатель pH должен быть $> 7,5$, для $MgCO_3$ – $> 8,0$ [41]. Поэтому количество гидрокарбонат-иона при таком pH недостаточное для формирования данных комплексов.

Таким образом, влияние ГК на состав поверхностных вод региона достаточно велико, даже если учитывать только растворенные формы миграции. И дело не только в высоких концентрациях самих органических веществ. Примерно такие же содержания ФГК в водах угленосных отложений, как показали предыдущие наши исследования [42], не сыграли значительной роли в миграции элементов, поскольку воды отличались высокой минерализацией. То есть важен определенный баланс между органической и неорганической (литогенной) составляющей вод. В нашем случае, когда концентрации РОВ сопоставимы с суммой анионов и катионов, а часто и превышают их, эффект влияния первых на состав вод максимален. Это необходимо учитывать при различных физико-химических расчетах, например, расчетах равновесий в системе вода–порода–ОВ.

Стоит, правда, оговориться, что влияние ФГК наибольшим образом сказывается не на миграции основных ионов, а на миграции микрокомпонентов. Максимально связывают в сумме (в виде $(Cu(ФК)_2)^{2-}$, $Cu(ФК)^0$, $CuГК^0$) ГК с медью – в среднем от 88,1 до 99,4 % (то есть почти полностью). На втором месте стоит никель ($Ni(ФК)^0$, $NiГК^0$) – от 23,9 до 62,9 %, далее марганец ($Mn(ФК)^0$, $MnГК^0$) – от 4,2 до 19,8 %, литий ($Li(ФК)^-$) и цинк ($Zn(ФК)^0$, $ZnГК^0$) – от 4,2 до 12,6 % и от 3,6 до 11,6 %, соответственно. Железо связывается менее охотно и только в виде $Fe(ФК)^0$ – от 0,4 до 2,9 % в среднем, максимально до 8,6 %.

Выводы

На территории Ямало-Ненецкого автономного округа в тундровой и лесотундровой природных зонах практически повсеместно распространены ультрапресные поверхностные воды с высокими концентрациями РОВ и, прежде всего, гумусовых кислот. При сравнении вод разных водосборных бассейнов рек не было выявлено особых различий. Интереснее было посмотреть эволюцию состава вод в направлении просадки–озера–река. Проведенные исследова-

ния распределения в водах региона гумусовых кислот и расчеты их растворенных форм миграции показали следующие результаты.

1. Воды просадок, расположенных в возвышенных частях водоразделов, характеризуются наибольшим показателем соотношения РОВ/Σионов (иногда в десятки раз), как и самыми высокими концентрациями гумусовых кислот, что говорит о существенном влиянии торфяных горизонтов почв на формирование их состава. На это указывает и завышенный показатель ГК:ФК относительно почв. Для них характерны самые максимальные показатели связываемости элементов органическим веществом. При этом гуминовые кислоты иногда оказывают большее влияние на некоторые элементы, чем фульвокислоты (например, для марганца, кальция, никеля, магния).
2. При поверхностном стоке воды в озера увеличивается минерализация вод, а количество растворенных органических веществ, наоборот, уменьшается. При общем пониженном количестве ФГК (относительно просадок) для вод озер характерно самое большое отношение ГК:ФК, что можно объяснить холодными и влажными условиями их формирования. Количество форм миграции элементов с гумусовыми кислотами уменьшается, но остается на высоком уровне.
3. Воды просадок и озер питают реки, воды которых, в свою очередь, характеризуются самыми высокими значениями минерализации, более высоким показателем pH, минимальными концентрациями РОВ (в том числе гумусовых кислот). Низкие соотношения ГК:ФК указывают на хорошую степень разложения ОВ, что, в частности, подтверждается преобладанием гидрокарбонат-иона в анионном составе вод. Несмотря на появление карбонатных форм миграции, все-таки органоминеральные комплексы продолжают превалировать.
4. В целом высокие концентрации гумусовых кислот поверхностных вод, имеющих низкую общую минерализацию, обеспечили большой процент образования органоминеральных соединений. При этом при рассмотрении форм миграции самих ФГК это было не так очевидно. Мы можем только отметить, что более подвержены комплексообразованию фульвокислоты (в среднем от 50 до 70 % ФК образуют комплексы), в то время как гуминовые кислоты предпочитают мигрировать в ионном виде $(ГК)^-$ (в среднем от 70 до 90 %).
5. Более интересной оказалась обратная задача: рассмотрение форм миграции основных ионов и микрокомпонентов с гумусовыми кислотами. Большинство мигрируют в простой ионной форме, однако на втором месте – соединения с ФГК, чаще с фульвокислотами. Доля таких соединений иногда оказывается очень значительной, больше всего это касается микрокомпонентов. Наиболее активно связываются с органическим веществом медь и никель – до 100 %, марганец – до 35 %, литий – до 28 %, цинк – до 25 %, железо, кальций и натрий – до 9 %, магний и калий – до 5 %.

Конечно, стоит отметить, что это только расчетные исследования, которые необходимо подтверждать натурными наблюдениями, что мы и планируем сделать далее. Но уже сейчас очевидно влияние гумусовых кислот на состав вод, особенно при рассмотрении формирования вод просадок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сезонные и межгодовые вариации концентраций и стоков растворенных и взвешенных форм органического углерода, железа и марганца Северной Двины в Белое море / В.В. Гордеев, А.И. Коченкова, А.С. Лохов, А.Е. Яковлев, С.К. Белорыков, В.Ю. Федулов // *Океанология*. – 2021. – Т. 61. – № 1. – С. 41–55.
2. Seasonal and annual fluxes of nutrients and organic matter from large rivers to the Arctic Ocean and surrounding seas / R.M. Holmes, J.W. McClelland, B.J. Peterson, S.E. Tank, E. Bulygina, T.I. Eglinton, V.V. Gordeev, T.Y. Gurtovaya, P.A. Raymond, D.J. Repeta, R. Staples, R.G. Striegl, A.V. Zhulidov, S.A. Zimov // *Estuaries and Coasts*. – 2012. – V. 35. – P. 369–382.
3. Major and trace elements in suspended matter of Western Siberian rivers: first assessment across perma-frost zones and landscape parameters of watersheds / I.V. Krickov, A.G. Lim, R.M. Manasyrov, S.V. Loiko, S.N. Vorobyev, O.S. Pokrovsky, V.P. Shevchenko, O.M. Dara, V.V. Gordeev // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 2020. – V. 269 – P. 429–450.
4. Геохимические закономерности распространения элементов в водах озер арктических регионов / Т.И. Моисеенко, М.И. Дину, Н.А. Гашкина, Т.А. Кремлева, В.Ю. Хорошавин // *Геохимия*. – 2020. – Т. 65. – № 6. – С. 521–532.
5. Major-ion chemistry and quality of water in rivers of Northern West Siberia / I.S. Ivanova, O.G. Savichev, N.S. Trifonov, Yu.V. Kolubaeva, N.A. Volkova // *Water*. – 2021. – V. 13. – P. 3107.
6. Дину М.И., Шкинев В.М. Комплексообразование ионов металлов с органическими веществами гумусовой природы: методы исследования и структурные особенности лигандов, распределение элементов по формам // *Геохимия*. – 2020. – Т. 65. – № 2. – С. 165–177.
7. Mechanism and multi-step kinetic modelling of Cr(VI) adsorption, reduction and complexation by humic acid, humin and kerogen from different sources / S. Barnie, J. Zhang, P. Obeng, A. Duncan, C. Adenutsi, L. Xu, H. Chen // *Environmental Science and Pollution Research*. – 2021. – V. 28. – P. 38985–39000.
8. Левшина С.И., Матюшкина Л.А. Особенности распределения растворенных форм металлов и металло-гумусовых комплексов в водах Зейского водохранилища // *Водные ресурсы*. – 2021. – Т. 48. – № 6. – С. 685–695.
9. Shelf humic substances as carriers for basin-scale iron transport in the North Pacific / Y. Yamashita, J. Nishioka, H. Obata, H. Ogawa // *Scientific Reports*. – 2020. – V. 10. – P. 4505.
10. Arsenate removal from underground water by polystyrene-confined hydrated ferric oxide (HFO) nanoparticles effect of humic acid / Y. Deng, Q. Zhang, Q. Zhang, Y. Zhong, P. Peng // *Environmental science and pollution research*. – 2020. – V. 27. – P. 6861–6871.
11. Impact of competitive Fe(III) ion on the complexation of humic acid and toxic metal ions / Y. Yamamoto, F. Kita, N. Isono, S. Imai // *The Japan Society for Analytical Chemistry*. – 2017. – V. 66. – P. 875–883.
12. Metal speciation in water of the flooded mine «Arsenic» (Karelia, Russia): equilibrium-kinetic modeling with a focus on the influence of humic substances / E. Cherkasova, A. Konyshev, E. Soldatova, E. Sidkina, M. Mironenko // *Aquatic Geochemistry*. – 2021. – V. 27. – P. 141–158.
13. Линник И.А., Набиванец Б.И. Формы миграции металлов в пресных поверхностных водах. – Л.: Гидрометеоздат, 1986. – 273 с.
14. Mantoura R.F.C., Dickson A., Riley S.P. The complexation of metals with humic materials in natural waters // *Estuarine and Coastal Marine Science*. – 1978. – V. 6. – P. 387–408.
15. Изучение органических веществ поверхностных вод и их взаимодействие с ионами металлов / Г.М. Варшал, И.Я. Кошечева, И.С. Сироткина, Т.К. Велюханова, Л.Н. Инцирвели, Н.С. Замокина // *Геохимия*. – 1979. – № 4. – С. 598–607.
16. Липатникова О.А., Гричук Д.В. Термодинамическое моделирование форм нахождения тяжелых металлов в донных отложениях на примере Ивановского водохранилища // *Вестник Московского Университета Сер. 4. Геология*. – 2011. – № 2. – С. 51–59.
17. Линник П.Н., Жежеря В.А. Особенности гидрохимического режима водоемов урбанизированной территории в летний период. II. Сосуществующие формы металлов // *Экологическая химия*. – 2021. – Т. 30. – № 3. – С. 129–142.
18. Alberts J.J., Takacs M., Pattanayek M. Naturel organic matter from a Norwegian lake: possible structural changes resulting from lake acidification // *Humic Substances*. – Sawston: Nova, 2000. – P. 261–275.
19. Evans C.D., Monteith D.T. Water chemistry discussion // *UK Acid Waters Monitoring Network: 10 Year Report*. – London: ENSIS Publ., 2000. – P. 269–303.
20. Vinodh R., Padmavathi R., Sangeetha D. Separation of heavy metals from water samples using anion exchange polymers by adsorption process // *Desalination*. – 2011. – V. 267. – P. 267–276.
21. Fluorescent characteristics and metal binding properties of individual molecular weight fractions in municipal solid waste leachate / J. Wu, H. Zhang, L.M. Shao, P.J. He // *Environmental Pollution*. – 2012. – V. 162. – P. 63–71.
22. Organic and organo-mineral colloids of discontinuous permafrost zone / O.S. Pokrovsky, R.M. Manasyrov, S.V. Loiko, L.S. Shirokova // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 2016. – V. 188. – P. 1–20.
23. Impact of global change on the biogeochemistry and ecology of an Arctic freshwater system / J.E. Hobbie, B.J. Peterson, N. Bettez, L. Deegan, W.J. O'Brien, G.W. Kling, G.W. Kipphut, W.B. Bowden, A.E. Hershey // *Polar Research*. – 1999. – V. 18. – P. 207–214.
24. Frey K.E., Siegel D.I., Smith L.C. Geochemistry of west Siberian streams and their potential response to permafrost degradation // *Water Research*. – 2007. – V. 43. – P. W03406.
25. Temperature regimes of northern taiga soils in the isolated permafrost zone of Western Siberia / O.Y. Goncharova, G.V. Matyshak, A.A. Bobrik, N.G. Moskalenko, O.E. Ponomareva // *Eurasian Soil Science*. – 2015. – V. 48. – P. 1329–1340.
26. Решетько М.В., Моисеева Ю.А. Климатические особенности и статистические оценки изменения элементов климата в районах вечной мерзлоты на территории севера Западной Сибири // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2016. – Т. 327. – № 4. – С. 108–118.
27. Шамилишвили Г.А., Абакумов Е.В., Печкин А.С. Особенности почвенного покрова Надымского района, ЯНАО // *Научный вестник Ямало-Ненецкого автономного округа*. – 2016. – № 4. – С. 12–16.
28. Государственный доклад «О состоянии и использовании водных ресурсов Российской Федерации в 2018 году». – М.: НИА-Природа, 2019. – 290 с.
29. Букаты М.Б. Рекламно-техническое описание программного комплекса HydroGeo. Номер гос. регистрации алгоритмов и программ во Всероссийском научно-техническом информационном центре (ВНТИЦ) № 50200500605. – М.: ВНТИЦ. – 2005. – 7 с.
30. Гаррельс Р.М., Крайст Ч.Л. Растворы, минералы, равновесия. – М.: Изд-во «Мир», 1968. – 368 с.
31. Иванова И.С., Колубаева Ю.В. Тяжелые металлы в поверхностных водах Ямало-Ненецкого автономного округа // *Новые вызовы фундаментальной и прикладной геологии нефти и газа – XXI век*. – Новосибирск: Новосибирский государственный университет, 2021 – С. 67–70.

32. Орлов Д.С., Бирюкова О.Н., Суханова Н.И. Органическое вещество почв Российской Федерации. – М.: Изд-во «Наука», 1996. – 256 с.
33. Перминова И.В. Гуминовые вещества – вызов химикам XXI века // Химия и жизнь. – 2008. – № 1. – С. 50–55.
34. Василевская В.Д., Иванов В.В., Богатырев Л.Г. Почвы севера Западной Сибири. – М.: Изд-во Моск. университета, 1986. – 227 с.
35. Формы миграции химических элементов в водах заболоченных территорий района озера Поянху (Китай) / Е.А. Солдатова, Е.С. Сидкина, И.С. Иванова, Ц. Ли, И. Дон, Чж. Сунь // Геологическая эволюция взаимодействия воды с горными породами. – Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН, 2020. – С. 309–312.
36. Дину М.И., Моисеенко Т.И., Кремлева Т.А. Влияние процессов комплексообразования гумусовых веществ на формы миграции металлов в природных водах зон северной тайги и лесостепи Тюменской области // Вестник Тюменского государственного университета. – 2012. – № 12. – С. 71–79.
37. Формы миграции тяжелых металлов и химический состав поверхностных вод в районе шахты «Мышьяковская» (Питкярантский рудный район, Южная Карелия) / А.А. Кобышев, Е.С. Сидкина, Е.В. Черкасова, М.В. Мироненко, А.Г. Гридасов, А.В. Жилкина, И.А. Бугаев // Геохимия. – 2020. – Т. 65. – № 9. – С. 930–936.
38. Гаськова О.Л., Складорова О.А. Влияние природных органических кислот на отношение Mg/Ca в донных осадках высокоминерализованных озер // Геология и геофизика. – 2013. – Т. 54. – № 6. – С. 829–840.
39. Борзенко С.В., Фёдоров И.А. Основные формы миграции металлов в присутствии гуминовых веществ в содовых озерах Восточного Забайкалья // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330. – № 3. – С. 18–27.
40. Левшина С.И. Роль гумусовых кислот в миграции металлов в речных водах Приамурья // Водные ресурсы. – 2015. – Т. 42. – № 6. – С. 635–646.
41. Lepokurova O.E. Sodium-bicarbonate groundwaters in southeastern West Siberia, Russia: Compositions, types, and formation conditions // Applied Geochemistry. – 2020. – V. 116. – P. 104579.
42. Лепокурова О.Е., Трифонов Н.С., Домрочева Е.В. Миграционные формы основных ионов подземных вод угленосных отложений Кузбасса с акцентом на соединения с гумусовыми кислотами (по результатам моделирования) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов – 2022. – Т. 333. – № 3. – С. 76–89.

Поступила 18.02.2022 г.

Информация об авторах

Лепокурова О.Е., доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник Томского филиала Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН; профессор отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Иванова И.С., кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник Томского филиала Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН.

Трифонов Н.С., кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник Томского филиала Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН.

Колубаева Ю.В., кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник Томского филиала Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН.

Соколов Д.А., доктор биологических наук, старший научный сотрудник Томского филиала Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН; ведущий научный сотрудник Института почвоведения и агрохимии СО РАН.

UDC 556.314

DISSOLVED FORMS OF MIGRATION OF HUMIC SUBSTANCES IN SURFACE WATER BODIES OF THE YAMAL-NENETS AUTONOMOUS DISTRICT

Olesya E. Lepokurova^{1,2},
LepokurovaOY@ipgg.sbras.ru

Irina S. Ivanova¹,
ivanovais_1986@mail.ru

Nikolay S. Trifonov¹,
TrifonovNS@ipgg.sbras.ru

Yuliya V. Kolubaeva¹,
Kolubaeva@inbox.ru

Denis A. Sokolov^{1,3},
Sokolovdenis@mail.ru

¹ Tomsk Branch of the Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of SB RAS,
4, Academicheskaya avenue, Tomsk, 634055, Russia.

² National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

³ Institute of Soil Science and Agrochemistry of SB RAS,
8/2 Ac. Lavrentieva avenue, Novosibirsk, 630090, Russia.

The relevance. The river and lake waters of the Arctic regions of Western Siberia are enriched with dissolved organic matter, primarily humic acids, which are characterized by a good ability to form stable organomineral complexes. When studying the formation of the chemical composition of such waters, it is necessary to take into account the complex compounds that shift the equilibrium in geochemical processes (in dissolution, leaching, sedimentation and co-precipitation, etc.) towards the aqueous phase, thereby directly affecting the composition of waters. In the case of humic acids, a sufficient data on thermodynamic constants have been accumulated which made it possible to conduct numerical modeling.

The main aim is to consider the features of the distribution of humic substances (fulvic and humic acids) in the surface waters of the region and to calculate the migration forms based on the available new data on the chemical composition. Other issues are to study in what quantity and what elements are bound by humic substances; and whether there are differences between the waters belonging to different river basins. We also determine the role of organic matter, mainly humic substances, in the formation of the chemical composition of waters.

Objects: surface water bodies of the tundra and forest-tundra natural zones of the Yamalo-Nenets Autonomous District. The authors tried to cover the main stages of the surface water evolution in the direction of depression – large lakes – rivers, as well as consider the water bodies of different drainage basins of four main rivers – Taz, Pur, Ob, Nadym. As a result, 23 watercourses (large and small rivers) and 24 reservoirs (20 lakes of different sizes and 4 depressions) were studied.

Methods. Chemical composition of water was determined by standard methods at the Basic Research Laboratory of Hydrogeochemistry of the Tomsk Polytechnic University, the analysis of fulvic acids and humic acids was carried out by titration to account for bichromate consumed for the oxidation of carbon of fulvohumic acids. The migration forms of humic substances and chemical elements were calculated using the HydroGeo software.

Results. The features of distribution of humic substances in the direction of depression–lake–river in the main drainage basins of rivers in the north of Western Siberia were studied. The dissolved migration forms of humic acids relative to their concentrations were determined by thermodynamic calculations, and the forms of migrations of the main ions and trace elements were determined taking into account the content of humic acids, i. e. it is shown which part of them binds into organomineral complexes. It was determined that compounds with fulvohumic acids are the most common in all the described waters, but their maximum proportion is typical for depressions. Some of the trace elements are more prone to form organomineral forms than others: Cu, Ni, Mn, Li, Zn, Fe. Fulvic acids are more susceptible to complex formation. The patterns obtained must be taken into account when considering the conditions for the formation of these waters.

Key words:

Dissolved migration forms, thermodynamic modeling, humic substances, organomineral complexes, surface waters, Arctic, Yamalo-Nenets Autonomous District.

Field works and thermodynamic modeling of numerical forms of migration of chemical elements in waters of Yamalo-Nenets Autonomous District were financially supported by the RSF project no. 20-77-10084 and part of field works was funded by the project of fundamental scientific researches of the Russian Academy of Sciences no. 0266-2022-0016.

REFERENCES

- Gordeev V.V., Kochenkova A.I., Lokhov A.S., Yakovlev A.E., Belorukov S.K., Fedulov V.Yu. Seasonal and inter annual variations between concentrations and fluxes of dissolved and particulate organic carbon, iron and manganese from the Severnaya Dvina river to the White Sea. *Oceanology*, 2021, vol. 61, no. 1, pp. 34–47.
- Holmes R.M., McClelland J.W., Peterson B.J., Tank S.E., Buliygina E., Eglinton T.I., Gordeev V.V., Gurtovaya T.Y., Raymond P.A., Repeta D.J., Staples R., Striegl R.G., Zhulidov A.V., Zimov S.A. Seasonal and annual fluxes of nutrients and organic matter from large rivers to the Arctic Ocean and surrounding seas. *Estuaries and Coasts*, 2012, vol. 35, pp. 369–382.
- Krickov I.V., Lim A.G., Manasyrov R.M., Loiko S.V., Vorobyev S.N., Pokrovsky O.S., Shevchenko V.P., Dara O.M., Gordeev V.V. Major and trace elements in suspended matter of Western Siberian rivers: first assessment across permafrost zones and landscape parameters of watersheds. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2020, vol. 269, pp. 429–450.
- Moiseenko T.I., Dinu M.I., Gashkina N.A., Kremleva T.A., Khoroshavin V.Y. Geochemical features of elements distributions in the lake waters of the arctic region. *Geochemistry International*, 2020, vol. 58, no. 6, pp. 613–623.
- Ivanova I.S., Savichev O.G., Trifonov N.S., Kolubaeva Yu.V., Volkova N.A. Major-ion chemistry and quality of water in rivers of Northern West Siberia. *Water*, 2021, vol. 13, pp. 3107.
- Dinu M.I., Shkinev V.M. Complexation of metal ions with organic substances of humus nature: methods of study and structural features of ligands, and distribution of elements between species. *Geochemistry International*, 2020, vol. 58, no. 2, pp. 200–211.
- Barnie S., Zhang J., Obeng P., Duncan A., Adenutsi C., Xu L., Chen H. Mechanism and multi-step kinetic modelling of Cr(VI) adsorption, reduction and complexation by humic acid, humin and kerogen from different sources. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, vol. 28, pp. 38985–39000.
- Levshina S.I., Matyushkina L.A. The distribution of dissolved forms of metals and metal–humus complexes in Zeya reservoir water. *Water Resources*, 2021, vol. 48, no. 6, pp. 967–976.
- Yamashita Y., Nishioka J., Obata H., Ogawa H. Shelf humic substances as carriers for basin-scale iron transport in the North Pacific. *Scientific Reports*, 2020, vol. 10, pp. 4505.
- Deng Y., Zhang Q., Zhang Q., Zhong Y., Peng P. Arsenate removal from underground water by polystyrene-confined hydrated ferric oxide (HFO) nanoparticles effect of humic acid. *Environmental science and pollution research*, 2020, vol. 27, pp. 6861–6871.
- Yamamoto Y., Kita F., Isono N., Imai S. Impact of competitive Fe(III) ion on the complexation of humic acid and toxic metal ions. *The Japan Society for Analytical Chemistry*, 2017, vol. 66, pp. 875–883.
- Cherkasova E., Konyshev A., Soldatova E., Sidkina E., Mironenko M. 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*, 2021, vol. 27, pp. 141–158.
- Linnik I.A., Nabivanets B.I. *Formy migratsii metallov v presnykh poverkhnostnykh vodakh* [Forms of migration of metal in fresh surface waters]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1986. 273 p.
- Mantoura R.F.C., Dickson A., Riley S.P. The complexation of metals with humic materials in natural waters. *Estuarine and Coastal Marine Science*, 1978, vol. 6, pp. 387–408.
- Varshal G.M., Koshcheeva I.Ya., Sirotkina I.S., Velyukhanova T.K., Intskirveli L.N., Zamokina N.S. Izuchenie organicheskikh veshchestv poverkhnostnykh vod i ikh vzaimodeystvie s ionami metallov [Studying of organic matter of surface waters and their interaction with ions of metal]. *Geokhimiya*, 1979, no. 4, pp. 598–607.
- Lipatnikova O.A., Grichuk D.V. Thermodynamic modeling of heavy metals forms in bottom sediments of the Ivankovsky reservoir. *Moscow University Geology Bulletin*, 2011, no. 2, pp. 51–59. In Rus.
- Linnik P.N., Zhezherya V.A. Features of the hydrochemical regime of water bodies of the urbanized territory in summer period: II. Coexisting forms of metals. *Russian Journal of General Chemistry*, 2021, vol. 91, pp. 2827–2838.
- Alberts J.J., Takacs M., Pattanayek M. Nature organic matter from a Norwegian lake: possible structural changes resulting from lake acidification. *Humic Substances*. Sawston, Nova Publ., 2000. pp. 261–275.
- Evans C.D., Monteith D.T. Water chemistry discussion. *UK Acid Waters Monitoring Network: 10 Year Report*. London, ENSIS Publ., 2000. pp. 269–303.
- Vinodh R., Padmavathi R., Sangeetha D. Separation of heavy metals from water samples using anion exchange polymers by adsorption process. *Desalination*, 2011, vol. 267, pp. 267–276.
- Wu J., Zhang H., Shao L.M., He P.J. Fluorescent characteristics and metal binding properties of individual molecular weight fractions in municipal solid waste leachate. *Environmental Pollution*, 2012, vol. 162, pp. 63–71.
- Pokrovsky O.S., Manasyrov R.M., Loiko S.V., Shirokova L.S. Organic and organo-mineral colloids of discontinuous permafrost zone. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2016, vol. 188, pp. 1–20.
- Hobbie J.E., Peterson B.J., Bettes N., Deegan L., O'Brien W.J., Kling G.W., Kipphut G.W., Bowden W.B., Hershey A.E. Impact of global change on the biogeochemistry and ecology of an Arctic freshwater system. *Polar Research*, 1999, vol. 18, pp. 207–214.
- Frey K.E., Siegel D.I., Smith L.C. Geochemistry of west Siberian streams and their potential response to permafrost degradation. *Water Research*, 2007, vol. 43, pp. W03406.
- Goncharova O.Y., Matyshak G.V., Bobrik A.A., Moskalenko N.G., Ponomareva O.E. Temperature regimes of northern taiga soils in the isolated permafrost zone of Western Siberia. *Eurasian Soil Science*, 2015, vol. 48, pp. 1329–1340.
- Reshetko M.V., Moiseeva Y.A. Climatic features and statistical assessments of elements of climate changes in permafrost areas in the north of Western Siberia. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2016, vol. 327, no. 4, pp. 108–118. In Rus.
- Shamilishvili G.A., Abakumov E.V., Pechkin A.S. Features of soil cover of the Nadym region, Yamal-Nenets autonomous district. *Scientific Bulletin of the Yamal-Nenets Autonomous District*, 2016, no. 4, pp. 12–16. In Rus.
- Gosudarstvennyy doklad «O sostoyanii i ispolzovanii vodnykh resursov Rossiyskoy Federatsii v 2018 godu» [State report «On the state and use of water resources of the Russian Federation in 2018»]. Moscow, NIA-Priroda Publ., 2019. 290 p.
- Bukaty M.B. *Reklamno-tekhnicheskoe opisanie programmnogo kompleksa HydroGeo. Nomer gos. registratsii algoritmov i programm vo Vserossiyskom nauchno-tekhnicheskoy informatsionnoy tsentre (VNTITS) № 50200500605* [Advertising and technical description of the HydroGeo software. State number registration of algorithms and programs in the All-Russian Scientific and Technical Information Center]. Moscow, VNTITS Publ., 2005. 7 p.
- Garrels R.M., Christ Ch.L. *Solutions, minerals and equilibria*. New York, Harper & Row Publ., 1965. 450 p.
- Ivanova I.S., Kolubaeva Yu.V. Tyazhelye metally v poverkhnostnykh vodakh Yamalo-Nenetskogo avtonomnogo okruga [Heavy metals in surface waters of Yamalo-Nenets autonomous okrug]. *Novye vyzovy fundamentanoy i prikladnoy geologii nefi i gaza – XXI vek* [New challenges of fundamental and applied geology of oil and gas – XXI century]. Novosibirsk, Novosibirsk State University Publ., 2021. pp. 67–70.
- Orlov D.S., Biryukova O.N., Sukhanova N.I. *Organicheskoe veshchestvo pochv Rossiyskoy Federatsii* [Soil organic matter of the Russian Federation]. Moscow, Nauka Publ., 1996. 256 p.
- Perminova I.V. Guminovye veshchestva – vyzov khimikam XXI veka [Humic substances – a challenge to chemists XXI century]. *Khimiya i zhizn*, 2008, no. 1, pp. 50–55.
- Vasilevskaya V.D., Ivanov V.V., Bogatyrev L.G. *Pochvy severa Zapadnoy Sibiri* [Soils of the north of Western Siberia]. Moscow, Moscow University Publ., 1986. 227 p.
- Soldatova E.A., Sidkina E.S., Ivanova I.S., Li J., Dong Y., Sun Zh. Formy migratsii khimicheskikh elementov v vodakh zabolochennykh territoriy rayona ozera Poyankhu (Kitay) [Migration forms of chemical elements in the waters of the Poyang Lake wetland, China]. *Geologicheskaya evolyutsiya vzaimodeystviya vody s gornymi porodami* [Water-Rock Interaction: Geological Evolution]. Ulan-Ude, BSC SB RAS Publ., 2020. pp. 309–312.

36. Dinu M.I., Moiseyenko T.I., Kremleva T.A. Effect of humic substance complex formation on metal migration forms in the natural waters of the northern taiga and forest-steppe zones in the Tyumen region. *Tyumen State University Herald*, 2012, no. 12, pp. 63–70.
37. Konyshov A.A., Sidkina E.S., Cherkasova E.V., Mironenko M.V., Zhilkina A.V., Bugaev I.A., Gridasov A.G. Migration forms of heavy metals and chemical composition of surface waters in the «Arsenic» shaft area (Pitkäranta ore district, South Karelia). *Geochemistry International*, 2020, vol. 58, no. 9, pp. 1068–1074.
38. Gaskova O.L., Sklyarova O.A. Influence of natural organic acids on the Mg/Ca ratio in the bottom sediments of highly mineralized lakes. *Russian Geology and Geophysics*, 2013, vol. 54, no. 6, pp. 637–645.
39. Borzenko S.V., Fedorov I.A. Basic forms of metals migration in the presence of humic substances in soda lakes of Eastern Transbaikalia. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 3, pp. 18–27. In Rus.
40. Levshina S.I. The role of humic acids in migration of metals in river waters in Amur region. *Water resources*, 2015, vol. 42, no. 6, pp. 810–820.
41. Lepokurova O.E. Sodium-bicarbonate groundwaters in southeastern West Siberia, Russia: Compositions, types, and formation conditions. *Applied Geochemistry*, 2020, vol. 116, pp. 104579.
42. Lepokurova O.E., Trifonov N.S., Domrocheva E.V. Migration forms of basic ions in groundwater of coal-bearing sediments of Kuzbass with a focus on compounds with humic acids (by simulation results). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, no. 3, pp. 76–89. In Rus.

Received: 18 February 2022.

Information about the authors

Olesya E. Lepokurova, Dr. Sc., leading researcher, Tomsk Branch of the Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of SB RAS; professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Irina S. Ivanova, Cand. Sc., senior researcher, Tomsk Branch of the Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of SB RAS.

Nikolay S. Trifonov, Cand. Sc., senior researcher, Tomsk Branch of the Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of SB RAS.

Yuliya V. Kolubaeva, Cand. Sc., researcher, Tomsk Branch of the Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of SB RAS.

Denis A. Sokolov, Dr. Sc., senior researcher, Tomsk Branch of the Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of SB RAS; leading researcher, Institute of Soil Science and Agrochemistry of SB RAS.

УДК 553.08:553.21:553.25:553.31

МИНЕРАЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ВЕРХНЕМЕЛОВЫХ МОРСКИХ ЖЕЛЕЗНЯКОВ АЯТСКОЙ СВИТЫ (ТУРГАЙСКИЙ ПРОГИБ)

Максимов Прокопий Николаевич¹,
yakutprosh@gmail.com, pnm1@tpu.ru

Рудмин Максим Андреевич¹,
rudminma@tpu.ru

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 635050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

Актуальность. Наиболее распространённым типом осадочных месторождений железа являются залежи морских ооидовых железняков. Условия образования фанерозойских ооидовых железняков долгое время служат предметом для многочисленных дискуссий.

Цель работы заключается в изучении минералого-геохимических особенностей ооидовых железняков аятской свиты верхнемелового возраста для оценки седиментационных и геохимических условий их образований.

Методика исследования включала в себя следующие виды лабораторно-аналитических работ: петрографический анализ, рентгенодифракционный анализ, сканирующая электронная микроскопия, рентгенофлуоресцентный анализ, масс-спектрометрия с индуктивно связанной плазмой.

Была получена минералого-геохимическая характеристика аятских железняков, указывающая на их диагенетическое формирование в прибрежно-морских условиях. Основными *in situ* формами в породах являются бертьерин-сидеритовые ооиды, пеллоиды, микроооиды и преимущественно карбонатный цемент. Наличие второстепенных аутигенных минералов, таких как глаукоцит, апатит, пирит, вюрцит и барит, указывает на колебания физико-химических условий среды при диагенезе железистых осадков аятской свиты. Формирование пирита и вюрцита контролировалось придонной обстановкой с дефицитом кислорода и активной бактериальной сульфат-редукцией. Ассоциация сидерита, бертьерина, вюрцита, пирита и барита среди ооидов указывает на, вероятно, единый механизм поступления основных минералообразующих ионов. По данным масс-спектрологии среднее суммарное содержание редкоземельных элементов составило 83,1 ppm, при этом наблюдается общий дефицит La, Ce, Pr, Nd. Характер поведения микроэлементов в валовом составе железняков аятской свиты имеет общие тренды с континентальными железняками Лисаковского месторождения. Это позволяет судить о сходстве процессов образования основных форменных элементов для обоих типов железняков.

Ключевые слова:

Ооидовые железняки, диагенез, минералогия, геохимия, аятская свита, Тургайский прогиб.

Введение

Морские ооидовые железняки пользуются широким распространением в различных регионах Земли и формировались в определенные периоды фанерозоя. Эти отличительные осадочные породы долгое время являются объектом для фундаментальных геологических исследований [1–5], многие из которых направлены на изучение глобальной эволюции океана [6, 7]. Природа ооидовых железняков остаётся дискуссионной проблемой во многом в силу отсутствия соизмеримых современных аналогов подобных залежей [4, 8, 9]. Одна из гипотез генезиса основывается на континентальном источнике железа. Её ключевые положения заключаются в интенсивной мобилизации металлов при выветривании горных пород магматического и метаморфического генезиса, их переносе преимущественно речными и подземными водами в виде коллоидов или истинных растворов и осаждении в зоне прибрежно-морской седиментации [10–12]. Формирование крупных месторождений ооидовых (или оолитовых) железных руд ряд ученых связывает с флюидной разгрузкой в морских обстановках, подобной так называемым «холодным просачиваниям» (cold seeps) или вулканическим эксгалациям в некоторых современных морях [4, 8–10, 13, 14]. Так, например, исследования ооидовых железняков с се-

веро-восточного карибского шельфа Венесуэлы (южнее о. Маргарита) позволили Майклу Кимберли выдвинуть теорию о гидротермальной мобилизации железонасыщенных растворов, которые замещали первичные оолитовые известняки в морских придонных условиях [4]. Также флюидная разгрузка как источник металлов рассматривается при изучении генезиса Западно-Сибирского железорудного бассейна (Россия) [8, 9, 14–16].

Основная цель данной работы заключается в изучении петрографических и минералого-геохимических особенностей ооидовых железняков верхнемеловой аятской свиты для анализа седиментационных и геохимических условий их образования и оценки основных источников металлов.

Геологическая характеристика объекта

Объектом для исследования послужили верхнемеловые железняки аятской свиты, распространенные в пределах северной части Тургайского прогиба (рис. 1). Административно район изучаемого искусственного обнажения расположена в 130 км к юго-западу от г. Костанай в Костанайской области Республики Казахстан. Формирование Тургайского прогиба связано с юрскими и мел-кайнозойскими этапами структурного развития [17, 18]. В пределах проги-

ба в верхнемеловое время существовал уникальный трансконтинентальный Тургайский пролив, узкий и вытянутый в меридиональном направлении, соединявший Западно-Сибирское и Среднеазиатское (Туранское) моря, которые в настоящее время представ-

ляют собой крупные платформенные равнины [17, 18]. В позднем мелу в результате регионального погружения в пределах Тургайской впадины господствовал морской режим, с которым ассоциируются морские железняки аятского типа [17–22].

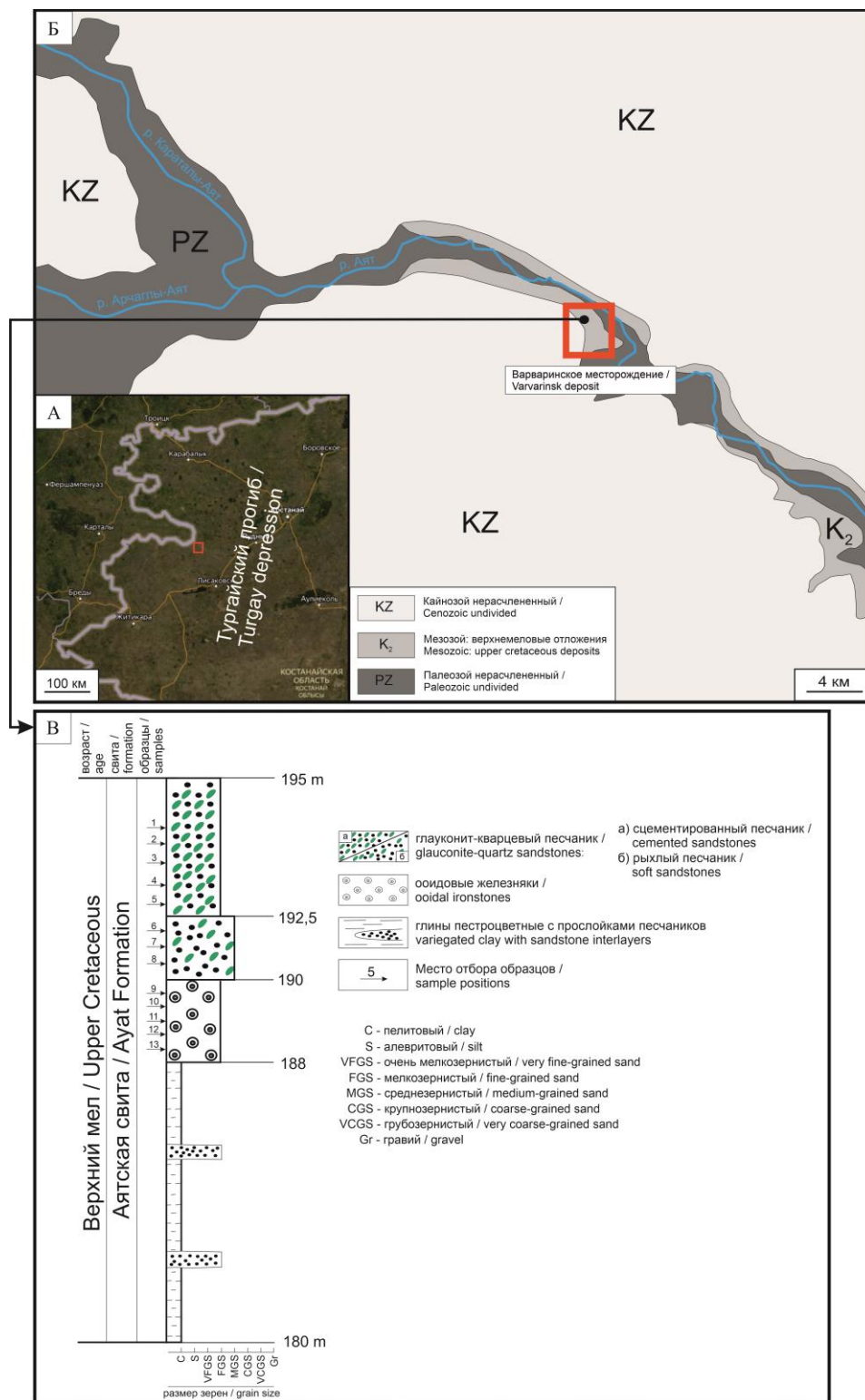


Рис. 1. А) обзорная схема (на основе Google Map) расположения Тургайского прогиба; Б) геологическая схема изучаемого района; В) литостратиграфическая колонка изучаемой части аятской свиты

Fig. 1. A) location map (based on Google Map) of the Turgay depression; B) simplified geological scheme; C) lithostratigraphic column of the Ayat Formation in the studied outcrop

Материал и методика исследования

Отбор проб железняков верхнемеловой аятской свиты осуществлялся из бортов вскрышных пород в пределах карьера Варваринского месторождения (рис. 1). Всего было отобрано 13 образцов из трёх основных литотипов. Из всех образцов были изготовлены полированные шлифы и аншлифы для петрографических и микроскопических исследований. При изготовлении шлифов и аншлифов для обработки поверхности образцов использовались абразивные порошки карбида кремния (SiC) размерной фракции до 3 мкм и алмазные суспензии (до 1 мкм) для тонкой полировки. Для определения минералогических и геохимических особенностей железняков и вмещающих пород аятской свиты проводился комплекс лабораторно-аналитических исследований имеющихся проб. Изучение литологических характеристик проводилось с помощью петрографического микроскопа (13 образцов). Микроструктурные и минеральные характеристики, химический состав отдельных минералов исследовались с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) TESCAN Vega 3 SBU, оснащенного детектором для энергодисперсионного рентгеноспектрального микроанализа OXFORD X-Max 50. СЭМ съёмки проводились в режиме полного вакуума при следующих параметрах: ускоряющее напряжение 20 кВ, интенсивность тока зонда в пределах 5...12 нА, фокусное расстояние 6...15 мм. Исследования проводились на полированных шлифах и аншлифах (13 препаратов) с тонким углеродным покрытием толщиной менее 15 нм. Определение валового минерального состава, идентификация глинистых минералов и количественный анализ минералов выполнялись методом рентгенодифракционного анализа (РДА; 13 образцов). Диаграммы записывались на дифрактометре Rigaku Ultima IV с Cu K α анодом при 40 кВ и 30 мА. Съёмка проводилась в диапазоне 3–65° по шкале 2-theta со скоростью 1° в минуту с шагом 0,02°. Аксессуарные минералы в расчетах не учитывались и, вероятно, составляют валовую долю менее 0,5 %. Содержания основных оксидов были определены рентгенофлуоресцентным методом с использованием микроанализатора HORIBA XGT 7200, оснащённым энергодисперсионным детектором с пределом обнаружения химических элементов до 0,01 %. Параметры РФА съёмки были следующие: напряжение 50 кВ, ток 0,5 мА, диаметр рентгеновского пучка 1,2 мм, время накопления спектра 100 с. Концентрации основных оксидов (Na₂O, MgO, Al₂O₃, SiO₂, P₂O₅, K₂O, CaO, TiO₂, MnO, Fe₂O_{3(tot)}) рассчитывались на основе метода калибровочной кривой. Калибровочные кривые для каждого оксида были построены на основе набора стандартных образцов горных пород (СГХ-1, СГХ-3, СГХ-5, СГХМ-1, СГХМ-2, СГХМ-3, СДУ-1, СТ-2а, СГД-2а, СКД-1, СГ-3, СГ-4). Исследуемые образцы (13 проб) подготавливались в несколько этапов: исходная тонко истёртая масса спрессовывалась под гидравлическим прессом в таблетки, после чего они прокаливались в муфельной печи при температуре 900 °С в течение 9 часов. Определение по-

терь при прокаливании (ППК) проводилось гравиметрическим методом как разница веса образца до и после спекания в муфельной печи. Содержания микроэлементов определялись в железняках и вмещающих породах (6 проб) с помощью масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ИСП-МС) на масс-спектрометре ELAN DRC-e.

Результаты

Петрография и минералогия

Изучаемый горизонт аятской свиты состоит из трех основных литотипов (рис. 1, В). В основании изучаемого горизонта залегают железняки мощностью до 2 м, над которыми залегают слабо сцементированные среднезернистые глауконит-кварцевые песчаники с различной степенью окатанности терригенного материала. Мощность слабо сцементированных песчаников составляет в среднем 1,5 м. Выше залегают крепко сцементированные глауконит-кварцевые песчаники с мощностью до 3,5 м.

Ооидовые железняки обладают бурым цветом с пористой текстурой и следами окисления. Среди компонентного состава наблюдаются детрит органической природы (рис. 2, В). Также присутствуют структуры «обволакивания» с весьма выдержанной толщиной по периферии железистых ооидов (рис. 2, Б), представленные сидеритом. Железняки в основном состоят на 40...50 % из карбонатного цемента (сидерит; рис. 2, Г), 30...40 % из ооидов (рис. 2, Б) и около 10 % приходится на другие аллотигенные и второстепенные *in situ* минералы. Ооиды имеют сферическую и субсферическую форму с размерами от 0,5 до 0,7 мм. Форма ооидов сохраняется независимо от их размеров. По строению ооиды состоят в основном из кварцевого ядра и кортекса (тонкие пластинки), представлены алюмосиликатной и карбонатной фазой, с различной долей железа, что детектируется как бертьерин и сидерит, соответственно (рис. 2, А, Б). В некоторых ооидах наблюдаются микротрещины, которые заполняются цементирующим минералом, иногда с включениями пирита.

Слабо сцементированные среднезернистые глауконит-кварцевые песчаники состоят преимущественно из окатанного обломочного материала. Размер обломков кварца достигает 1,5 мм в диаметре, тогда как обломки калиевых полевых шпатов (КПШ), ильменита, магнетита и некоторых других минералов не превышают 1 мм в диаметре. В отличие от вышележающих крепко сцементированных песчаников, слабо сцементированные среднезернистые глауконит-кварцевые песчаники характеризуются наибольшим содержанием глинистого материала (около 20 %), а также относительно крупными зёрнами терригенного материала.

Сцементированные глауконит-кварцевые песчаники состоят на 35 % из кварца, 30 % из кремнистого цемента, 15 % из КПШ, 10 % из зёрен глауконита, 5 % из пирита, а остальные 5 % приходится на второстепенные минералы, такие как апатит, магнетит, рутил и циркон. Зёрна кварца полуокатанные, местами полуугловатые. Пирит встречается в виде самостоятельных идиоформных зёрен, фрамбоидов и отдельных мик-

ровключений в зернах глауконита (рис. 4, А). Помимо этого, наблюдается тонкая слоистость с толщиной слоев около 1 см, отличимая по обилию глауконита.

Аутигенные минералы в железняках представлены сидеритом, гетитом, пиритом, глауконитом, апатитом, фосфатами РЗЭ (аутигенный монацит), вурцитом и баритом. На рентгеновских дифрактограммах (рис. 3) ли-

тотипов изучаемого горизонта аятской свиты проявляются базальные отражения сидерита (1,5 Å, 3,6 Å), кварца (3,3 Å), микроклина (2,1 Å, 3,2 Å) и пирита (2,7 Å). По валовому минеральному составу доля сидерита, пирита и алюмосиликатных минералов составляет около 90, 2 и 8 %, соответственно. Основными аллотигенными минералами являются кварц, КПШ, циркон и рутил.

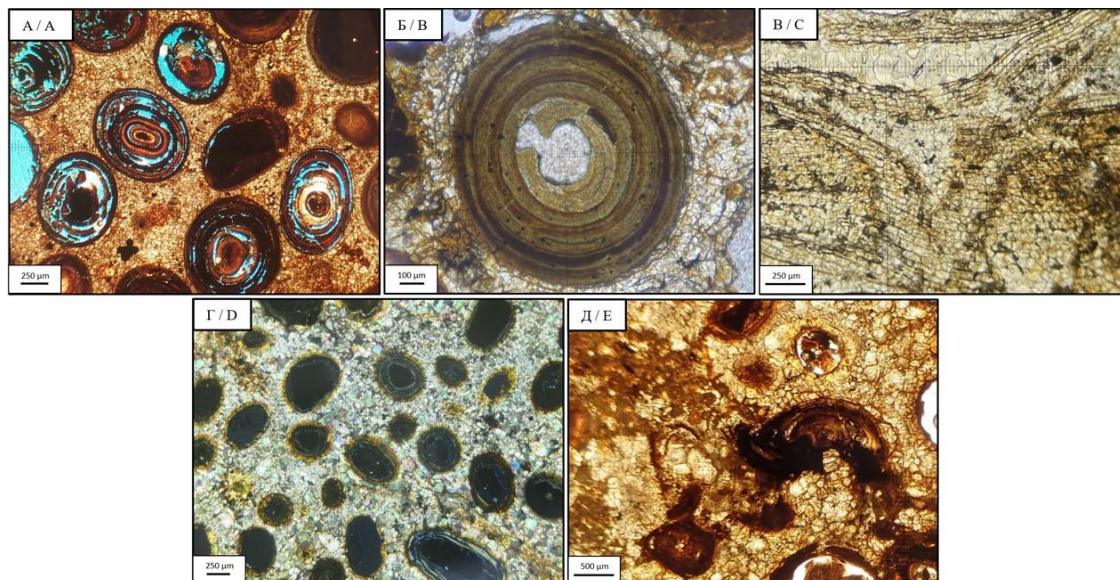


Рис. 2. Снимки ооидовых железняков в проходящем свете (без анализатора): А) ооидовые структуры; Б) включения в кортексе; В) органогенная структура; Г) сидеритовый цемент (скрещенные николи); Д) разрушенный ооид, залеченный рудным материалом

Fig. 2. Images of ooid ironstone in transmitted light (without an analyzer): А) ooid structures; В) inclusions in the cortex; С) biogenic structure; Д) siderite cement (crossed nicols); Е) destroyed ooid, healed with ore material

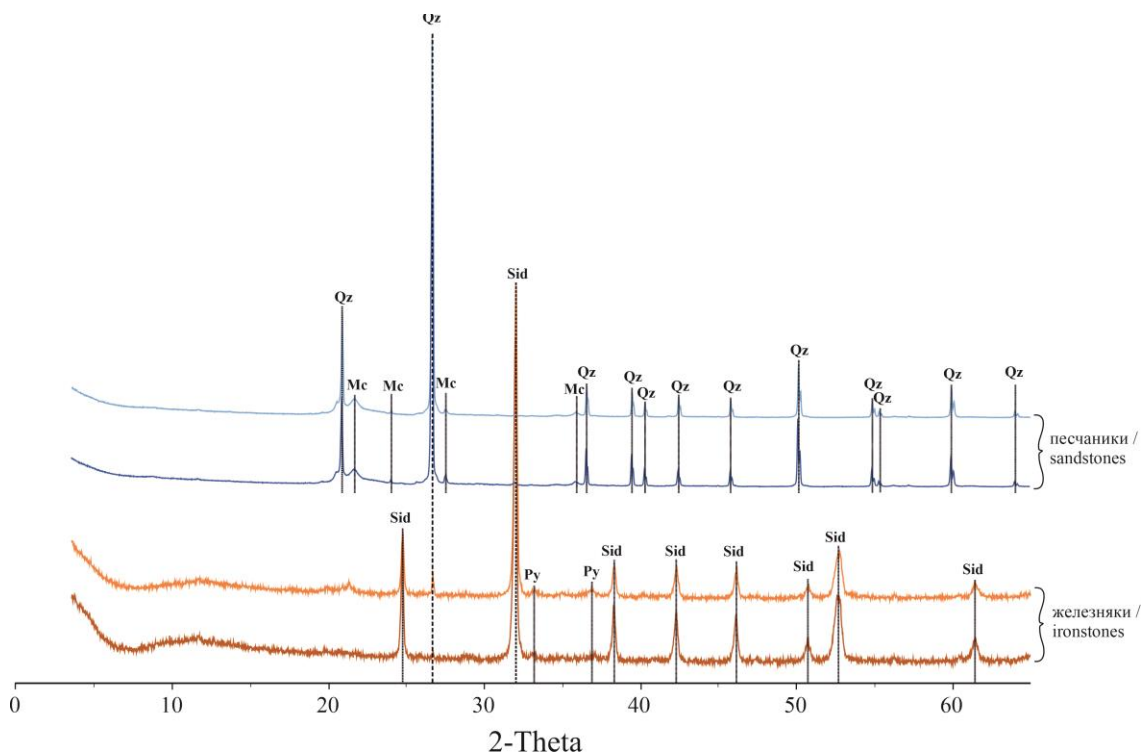


Рис. 3. Валовые рентгеновские дифрактограммы глауконит-кварцевых песчаников и ооидовых железняков: Qz – кварц, Sd – сидерит, Mc – микроклин, Py – пирит

Fig. 3. XRD patterns of the glauconite-quartz sandstone and the ooidal ironstone: Qz – quartz, Sd – siderite, Mc – microcline, Py – pyrite

Пирит как важный индикатор физико-химических условий диагенеза осадков встречается преимущественно в цементе, реже внутри ооидов в виде микровключений, заполняя отдельные концентрические кольцевые зоны кортекса (рис. 4). Пирит встречается в виде нормальных фрамбоидов (рис. 4, Д), фрамбоидов «обрастания», или так называемых «подсолнухов», («sunflower») и реже в виде макрофрамбоидов. Кроме того, отмечаются идиоморфные кристаллы преимущественно октаэдрического габитуса размером до 5 мкм (рис. 4, Г, Е).

Зерна глауконита в основном имеют глобулярную, реже лопастную форму с размерами 0,2...0,5 мм.

Окраска зерен варьируется от зеленого до синевато-зеленого цвета. Поверхность зерен гладкая, но при этом отмечаются микротрещины, в которых часто фиксируются микровключения пирита и фосфата редкоземельных элементов (рис. 4, А).

Фосфаты РЗЭ, представленные аутигенным монацитом, встречаются относительно часто в виде микровключений ксеноморфных инъексоподобных форм в ассоциации с сидеритовым цементом, железистыми ооидами и глауконитовыми зёрнами (рис. 4, А, Ё). Размеры микровключений фосфата РЗЭ не превышают 0,05 мм.

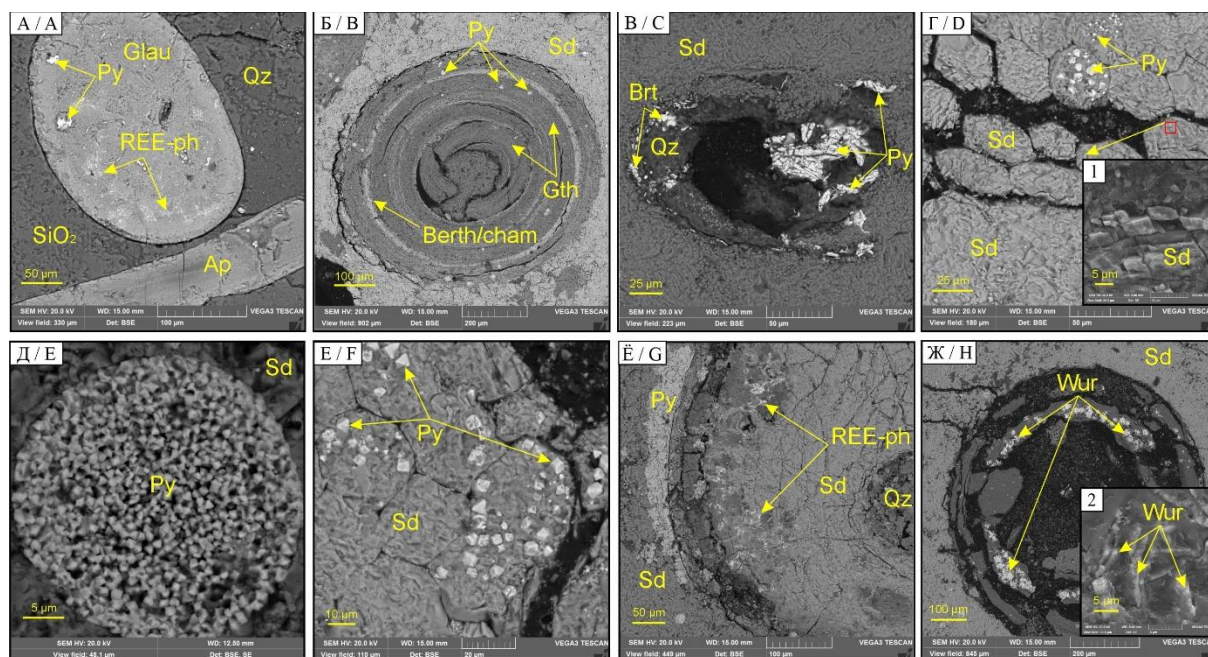


Рис. 4. СЭМ-изображения *in situ* минералов железняков и песчаников аятской свиты: А) зерна глауконита, апатита и кварца в кремнистом цементе; Б) ооид с контрастной ритмично-зональной внутренней структурой; В) барит в виде самостоятельных агрегатов; Г) органогенные структуры сидерита: 1 – микроструктуры сидерита; Е) нормальные фрамбоиды пирита; Е) идиоморфные кристаллы пирита; Ж) инъексоподобные микровключения фосфат редкоземельных элементов; З) розетковидные пластинчатые агрегаты вюрцитита: 2 – тонкопластинчатые микроструктуры вюрцитита. Qz – кварц, Glau – глауконит, Ap – апатит, Sd – сидерит, Py – пирит, Gth – гётит, Berth/Cham – бертьерин/шамозит, Wur – вюрцитит, Brt – барит, REE-ph – фосфат РЗЭ

Fig. 4. SEM images of *in situ* minerals of ironstones and sandstones of the Ayat Formation: А) grains of glauconite, apatite and quartz in siliceous cement; Б) ooid image; В) barite in the form of independent aggregates; Д) organogenic structures of siderite: 1 – siderite microcrystals; Е) normal framboids of pyrite; F) euhedral pyrite crystals G) injectable microinclusions of phosphate of rare earth elements; H) rosette-like lamellar aggregates of wurtzite: 2 – thin-lamellar wurtzite microcrystals. Qz – quartz, Glau – glauconite, Ap – apatite, Sd – siderite, Py – pyrite, Gth – goethite, Berth/Cham – berthierine/chamosite, Brt – barite, Wur – wurtzite, REE-ph – rare earth phosphate

Вюрцитит и барит создают собственные агрегаты среди ооидов и сидеритового цемента. Вюрцитит образует розетковидные пластинчатые агрегаты (рис. 4, Ж) преимущественно среди бертьериновых концентров в кортексе ооидов, также встречаются единичные агрегаты в виде сфероидов среди сидеритового цемента. Барит встречается в виде ксеноморфных зерен, как среди цементирующего материала, так и внутри ооидов, независимо от минеральной фазы кортекса.

Апатит отмечается среди тонких слоев между глауконит-кварцевыми песчаниками и железняками

внутри каждого литотипа. Среди песчаников апатит встречается в виде вытянутых призматических зерен размерами до 350 мкм в длину (рис. 4, А). Для железняков характерны ксеноморфные агрегаты апатита преимущественно среди ооидов карбонатного состава. По частоте встречаемости апатит преобладает в сцементированных глауконит-кварцевых песчаниках.

Помимо аутигенных компонентов наблюдаются детритовые включения циркона, ильменита, рутила и псевдорутила среди сидеритового цемента железняков.

Геохимия

Глауконит-кварцевые песчаники характеризуются высоким содержанием SiO_2 (80,8...83,0 %) и низким содержанием $\text{Fe}_2\text{O}_{3(\text{total})}$ (1,9...2,8 %) относительно железняков. В валовом составе железняков на долю $\text{Fe}_2\text{O}_{3(\text{total})}$ приходится 60,2...62,6 %. Содержания SiO_2 (5,7...14,0 %), Al_2O_3 (2,9...5,9 %) и P_2O_5 (0,5...1,8 %) в железняках обусловлены наличием бергтерина/шамозита и фосфата РЗЭ (аутигенный монацит). Содержание TiO_2 (0,1...0,2 %) объясняется наличием аллотигенного рутила и ильменита.

Суммарное содержание легких, средних и тяжелых РЗЭ (ЛРЗЭ, СРЗЭ и ТРЗЭ, соответственно) в аятских железняках варьируется в следующих пределах: ЛРЗЭ (La, Ce, Pr, Nd) от 51,1 до 85,3 ppm; СРЗЭ (Sm, Eu, Gd)

от 6,9 до 14,1 ppm; ТРЗЭ (Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu) от 6,9 до 17,1 ppm. Распределение РЗЭ (рис. 5, А) в целом показывает общий дефицит легких РЗЭ, тогда как содержание средних и тяжелых РЗЭ, а также Y находится на уровне средних содержаний в постархейском австралийском сланце (РААС). Суммарное содержание РЗЭ аятских железняков варьирует в пределах 54,6...115,9 ppm, в среднем составляет 83,1 ppm.

Аятские железняки характеризуются высоким содержанием (рис. 5, Б) Co (99...219,3 ppm), Ni (106,3...208,3 ppm), Mo (4,8...10,2 ppm), U (4,2...14,0 ppm) и низким содержанием Cu (6,6...12,5 ppm), Sr (53,8...97,0 ppm), Zr (10,7...25,7 ppm), Ba (87,7...597,1 ppm), Hf (0,3...0,8 ppm), W (0,3...1,2 ppm), Th (1,9...2,3 ppm) по отношению к РААС.

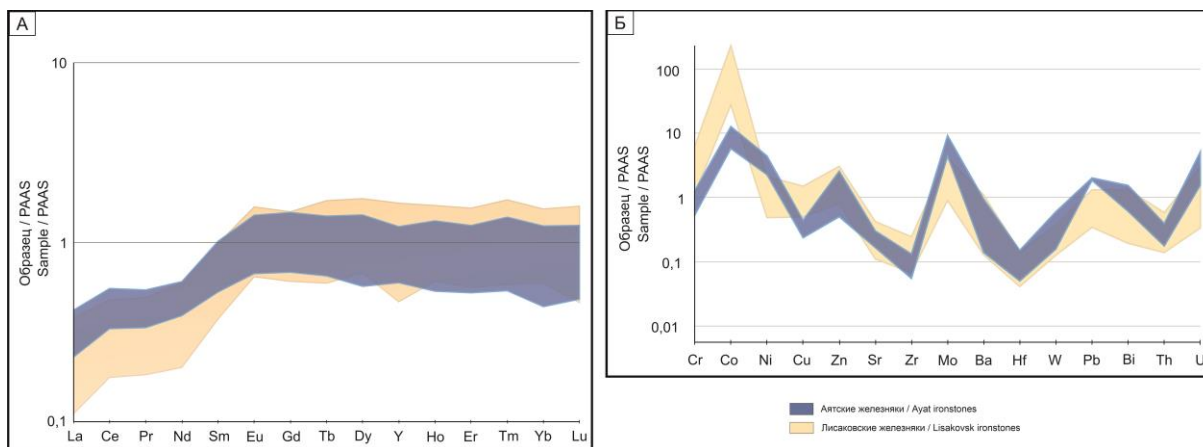


Рис. 5. Сравнительный анализ редкоземельных элементов (А) и микроэлементов (Б) отложений железняков аятской свиты и Лисаковского месторождения. Спайдер-диаграммы построены на основе нормирования значений на стандарт РААС (постархейский австралийский глинистый сланец) [23]

Fig. 5. Compared analysis of rare earth elements (A) and trace elements (B) for ironstones of Ayat Formation and Lisakovsk deposit. Spider-diagrams were constructed based on the normalization of values to PAAS-standard (Post-Archean Australian shale) [23]

Обсуждение

Физико-химические условия минералообразования

Результаты петрографических, минералогических и геохимических исследований показывают несколько признаков, свидетельствующих о смене условий осадкообразования в изучаемой последовательности аятской свиты. Во-первых, отличительный минеральный состав цемента между литотипами является доказательством изменения условий диагенеза. Во-вторых, взаимоотношения аутигенных минералов доказывают стадийность процессов минералообразования при формировании железняков аятской свиты.

Наличие глауконита и аутигенного пирита является важным индикатором минералообразования в прибрежно-морских обстановках в условиях от субкислородной до анаэробной среды [9, 24–27]. Размерность и морфология фрамбоидов пирита указывают на условия поровой среды ниже границы вода–осадок с дефицитом кислорода [28–30]. При этом наличие пирита и вюрцита указывает на деятельность сульфат-редуцирующих бактерий в сульфидной восстановительной среде [31, 32]. Формирование обильного

количества фрамбоидов пирита и наличие макрофрамбоидов свидетельствуют о продолжительной и стабильной среде, где граница хемоклина совпадает с границей вода–осадок [33]. Формирование сидерита связано с истощенной кислородом средой [34, 35]. Обильное количество сидеритовых ооидов напрямую указывает на метановые условия диагенеза [36]. Наличие в сидеритовом цементе микровключений таких минералов, как барит, вюрцит и фосфат РЗЭ (аутигенный монацит) (рис. 4, В, Ё, Ж), позволяет предположить сингенетическое концентрирование Fe, Ba, Zn и РЗЭ. Наличие глауконита, вероятно, свидетельствует о разложении органического субстрата, который служил источником энергии для роста глауконитовых гранул. Микровключения пирита и фосфат РЗЭ, образованные по микротрещинам (рис. 4, А), возможно, указывают на химическую диффузию между осадком и глауконитовым зерном [10, 37]. Присутствие микропрожилков пирита, залечивающих разрушенные ооиды и трещинные образования, доказывает постседиментационное минералообразование как следствие прогрессирующего диагенеза или локального эпигенеза.

Потенциальные источники вещества

В пределах территории Тургайского прогиба и по его периферийной части широко развиты средне-позднепалеозойские интрузивные комплексы базитового состава. Многие предшественники заключали, что потенциальными источниками железа для морских месторождений прогиба служили коры выветривания, преимущественно из горных массивов Южного Урала [20, 38].

Валовый химический состав указывает на различные условия и режимы осадконакопления между песчаниками и железняками аятской свиты. По минеральному составу аятские железняки состоят преимущественно из аутигенных минералов, за исключением небольшой доли аллотигенных компонентов, например, кварца, который часто выступает в роле ядра для большинства ооидов. Гётит-сидерит-бертьериновый кортекс ооидов и микровключения вюрцита, барита и пирита внутри этого кортекса указывают на единый раствор для формирования минералов. Подобные минеральные ассоциации характерны для ооидовых железняков Бакчарского месторождения, являющегося эталонным объектом гигантского Западно-Сибирского железорудного бассейна [8, 9, 14]. Бассейн приурочен к Западно-Сибирской плите, которая в юго-западной части примыкает к Тургайскому прогибу.

Характер поведения микроэлементов и РЗЭ в железняках аятской свиты отчасти коррелирует с Лисаковским месторождением континентальных ооидовых железных руд (рис. 5) [39]. Среднее суммарное содержание РЗЭ в железняках Лисаковского месторождения составляет 82,2 ppm [39], что соизмеримо с аятскими железняками (среднее значение РЗЭ – 83,1 ppm). Однако низкое содержание Cr, Co, Cu, повышенное содержание Ni, Mo, Pb и относительно меньший дефицит ЛРЗЭ отличают аятские морские железняки от лисаковских [39]. Поскольку формирование рудных залежей Лисаковского месторождения связано с механическим переносом ранее сформированных железняков в речные и дельтовые обстановки [39], геохимические различия с железняками аятской свиты можно объяснить растворением минералов исходного субстрата при их мобилизации в силу отличительных физико-химических условий среды. Генетические диаграммы $(Ce/Ce^*)/Nd$ и $(Ce/Ce^*)/(Y_{sn}/Ho_{sn})$ указывают на гидрогенное происхождение аятских железняков, как и лисаковских. Общие особенности сепарации РЗЭ и других редких металлов в морских железняках аятской свиты и континентальных железняках Лисаковского месторождения (рис. 6, А, Б) являются свидетельством единого механизма их концентрирования, включая потенциальные источники.

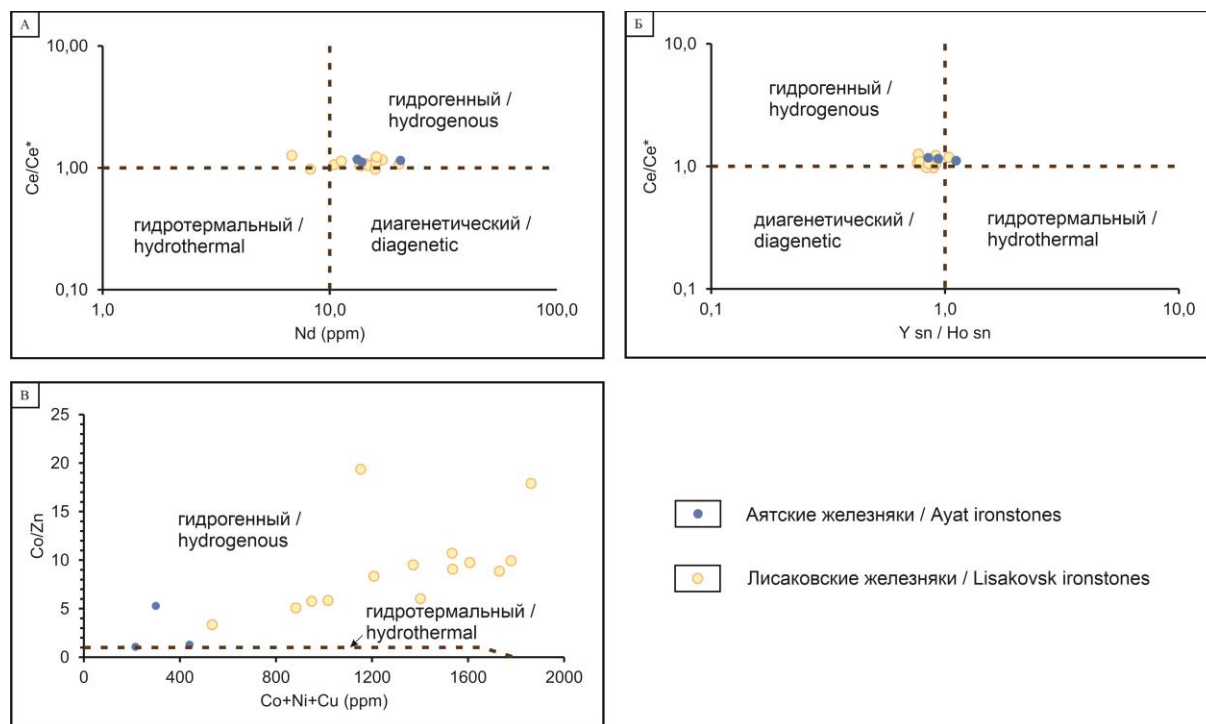


Рис. 6. Генетические диаграммы: А) зависимость между Ce/Ce^* и Nd [40]; Б) зависимость между Ce/Ce^* и Y_{sn}/Ho_{sn} [40]; В) зависимость между Co/Zn и $(Co+Ni+Cu)$ [41, 42]

Fig. 6. Genetic diagrams: A) cross-plot of Ce/Ce^* and Nd [40]; B) cross-plot of Ce/Ce^* and Y_{sn}/Ho_{sn} [40]; В) cross-plot of Co/Zn and $(Co+Ni+Cu)$ [41, 42]

С другой стороны, зависимость между Co/Zn и $(Co+Ni+Cu)$ показывает, что аятские железняки тяготеют к гидротермальному тренду, но при этом остаются в пределах гидрогенного поля (рис. 6, В). Схо-

жесть геохимических особенностей между аятскими и лисаковскими железняками дает возможность судить об однотипных диагенетических режимах формирования основной части железистых ооидов.

Вывод

Условия формирования морских железняков аятской свиты характеризуются неоднократной сменой физико-химических режимов диагенеза осадков морского дна. Основными *in situ* формами в железняках являются бертьерин-сидеритовые ооиды, пелоиды, микроооиды и преимущественно карбонатный цемент. Образование пирита и вюрцита свидетельствует о деятельности сульфатредуцирующих бактерий при дефиците кислорода на границе вода/осадок. Микровключения барита, вюрцита и фосфата РЗЭ (аутигенный монацит) в сиде-

ритовом цементе указывают на общий металлонесущий раствор для Fe, Ba, Zn и РЗЭ. Зависимость между Co/Zn и (Co+Ni+Cu) свидетельствует о гидрогенном концентрировании железистых форм, при этом отмечается тренд к гидротермальной области. Характер поведения редкоземельных элементов и микроэлементов аятских морских и лисаковских континентальных ооидовых железняков позволяет заключить о единых механизмах концентрирования металлов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 21-17-00019).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Van Houten F.B., Bhattacharyya D.P. Phanerozoic oolitic ironstones – geologic record and facies model // *Annual Review of Earth and Planetary Sciences.* – 1982. – V. 10. – № 1. – P. 441–457.
2. Kimberley M.M. Origin of oolitic iron formations // *SEPM Journal of Sedimentary Research.* – 1979. – V. 49. – P. 111–131.
3. Kimberley M.M. Exhalative origins of iron formations // *Ore Geology Reviews.* – 1979. – V. 5 (1–2) – P. 13–145.
4. Kimberley M.M. Debate about ironstone: has solute supply been surficial weathering, hydrothermal convection, or exhalation of deep fluids? // *Terra Nova.* – 1994. – V. 6. – № 2. – P. 116–132.
5. Young T.P. Phanerozoic ironstones: an introduction and review // *Geological Society, London, Special Publications.* – 1989. – V. 46. – № 1. – P. 9–25.
6. The geologic history of seawater oxygen isotopes from marine iron oxides / N. Galili, A. Shemesh, R. Yam, I. Brailovsky, M. Sela-Adler, E.M. Schuster, C. Collom, A. Bekker, N. Planavsky, F.A. Macdonald, A. Pr at, M. Rudmin, W. Trela, U. Sturesson, J.M. Heikoop., M. Aurell, J. Ramajo, I. Halevy // *Science.* – 2019. – V. 365. – P. 469–473.
7. Jiang C.Z., Halevy I., Tosca N.J. Kinetic isotope effect in siderite growth: Implications for the origin of banded iron formation siderite // *Geochimica et Cosmochimica Acta.* – 2022. V. 322. – P. 260–273.
8. Ferrimagnetic iron sulfide formation and methane venting across the Paleocene-Eocene thermal maximum in shallow marine sediments, Ancient West Siberian Sea / M. Rudmin, A. Roberts, C-S. Horng, A. Mazurov, O. Savinova, A. Ruban, R. Kashapov, M. Veklich // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems.* – 2018. – V. 19. – P. 1–22.
9. Ooidal ironstones in the Meso-Cenozoic sequences in western Siberia: assessment of formation processes and relationship with regional and global earth processes / M. Rudmin, S. Banerjee, A. Abdullayev, A. Ruban, E. Filimonenko, E. Lyapina, R. Kashapov, A. Mazurov // *Journal of Palaeogeography.* – 2020. – V. 9. – № 1. – P. 1–21.
10. Rudmin M., Banerjee S., Mazurov A. Compositional variation of glauconites in Upper Cretaceous-Paleogene sedimentary iron-ore deposits in South-eastern Western Siberia // *Sedimentary Geology.* – 2017. – V. 355. – P. 20–30.
11. Западно-Сибирский железорудный бассейн / Н.Х. Белоус, И.В. Николаева, Ю.П. Казанский, А.П. Бердников, В.М. Клярковский. – Новосибирск: Сибирское отделение Академии наук СССР, 1964. – 448 с.
12. Baioumy H., Omran M., Fabritius T. Mineralogy, geochemistry and the origin of high-phosphorus oolitic iron ores of Aswan, Egypt // *Ore Geology Reviews.* – 2017. – V. 80. – P. 185–199.
13. Modern iron ooids of hydrothermal origin as a proxy for ancient deposits / M. di Bella, G. Sabatino, S. Quartieri, A. Ferretti, B. Cavalazzi, R. Barbieri, F. Foucher, F. Messori., F. Italiano // *Scientific Reports.* – 2019. – V. 9. – № 1. – P. 1–10.
14. Rudmin M., Mazurov A., Banerjee S. Origin of ooidal ironstones in relation to warming events: Cretaceous-Eocene Bakchar deposit, south-east Western Siberia // *Marine and Petroleum Geology.* – 2019. – V. 100. – P. 309–325.
15. Павлов Д.И. Связь осадочных месторождений железа и марганца с нефтегазосносными бассейнами. Геология рудных месторождений. – 1989. – Т. 2. – С. 80–91.
16. Сопряженность рудо- и нефтеобразующих систем в осадочных бассейнах и прогноз рудных месторождений / Д.И. Павлов, ритовом цементе указывают на общий металлонесущий раствор для Fe, Ba, Zn и РЗЭ. Зависимость между Co/Zn и (Co+Ni+Cu) свидетельствует о гидрогенном концентрировании железистых форм, при этом отмечается тренд к гидротермальной области. Характер поведения редкоземельных элементов и микроэлементов аятских морских и лисаковских континентальных ооидовых железняков позволяет заключить о единых механизмах концентрирования металлов.
17. Геология юго-западной части Тургайского прогиба / Е.П. Бойцова, Е.А. Мазина, Б.М. Михайлов, Н.К. Овечкин // Труды всесоюзного научно-исследовательского геологического института ВСЕГЕИ министерства геологии и охраны недр. – М.: Госгеолтехиздат, 1955. – Т. 5. – 152 с.
18. Найдин Д.П. Разрез верхнего мела Кушмурун, Торгайский пролив // *Вестник Московского университета. Серия 4: Геология.* – 2006. – Т. 4. – С. 3–9.
19. Iakovleva A.I., Brinkhuis H., Cavagnetto C. Late Palaeocene–Early Eocene dinoflagellate cysts from the Turgay Strait, Kazakhstan; correlations across ancient seaways // *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology.* – 2001. – V. 172. – P. 243–268.
20. Формозова Л.Н. Железные руды Северного Приаралья // Труды ГИН АН СССР. Геологическая серия. – 1959. – Т. 20. – 444 с.
21. Кротов Б.П. Генезис Аятского месторождения // Оолитовые бурые железняки Кустанайской области и пути их использования. – М.: АН СССР, 1956. – С. 88–124.
22. Геология СССР. Т. 34. Тургайский прогиб. Ч. 2. Полезные ископаемые / под ред. Г.М. Тетерева. – М.: Недра, 1975. – 304 с.
23. Taylor S.R., McLennan S.M. The continental crust: its composition and evolution. An examination of the geochemical record preserved in sedimentary rocks. – Oxford: Blackwell, 1985. – 312 с.
24. Николаева И.В. Минералы группы глауконита в осадочных формациях. – Новосибирск: Наука, 1977. – 284 с.
25. Banerjee S., Bansal U., Vilas Thorat A. A review on palaeogeographic implications and temporal variation in glaucony composition // *Journal of Palaeogeography.* – 2016. – V. 5. – № 1. – С. 43–71.
26. Impact of green clay authigenesis on element sequestration in marine settings / A. Baldermann, S. Banerjee, G. Czuppon, M. Dietzel, J. Farkaš, S. L ohr, U. Moser, E. Scheibhofer, N. Wright, Th. Zack // *Nature Communications.* – 2022. – V. 13. – № 1. – P. 1–11.
27. Amorosi A. The occurrence of glaucony in the stratigraphic record: Distribution patterns and sequence-stratigraphic significance // *Rendiconti Online Societa Geologica Italiana.* – 2012. – V. 20. – P. 1–6.
28. Berner R.A. Sedimentary pyrite formation: an update // *Geochimica et Cosmochimica Acta.* – 1984. – V. 48. – P. 605–615.
29. Merinero R., C ardenes V. Theoretical growth of framboidal and sunflower pyrite using the R-package frambgrowth // *Mineralogy and Petrology.* – 2018. – V. 112. – P. 577–589.
30. Wilkin R.T., Barnes H.L., Brantley S.L. The size distribution of framboidal pyrite in modern sediments: An indicator of redox conditions // *Geochimica et Cosmochimica Acta.* – 1996. – V. 60. – P. 3897–3912.
31. Morse J.W., Luther G.W. Chemical influence on trace metal-sulphide interactions in anoxic sediments // *Geochimica et Cosmochimica Acta* – 1999. – V. 63. – P. 3373–3378.
32. Authigenic iron oxide proxies for marine zinc over geological time and implications for eukaryotic metallome evolution / L.J. Robbins, S.V. Lalonde, M.A. Saito, N.J. Planavsky, A.M. Mloszewski, E. Pecoits, C. Scott, C.L. Dupont, A. Kappler, K.O. Konhauser // *Geobiology.* – 2013. – V. 11. – P. 295–306.

33. Redox conditions and authigenic mineralization related to cold seeps in central Guaymas Basin, Gulf of California / F. Núñez-Useche, C. Canet, V. Liebetrau, T.P. Puig, A.C. Ponciano, P. Alfonso, C. Berndt, C. Hensen, C. Mortera-Gutierrez, A.A. Rodríguez-Díaz // *Marine and Petroleum Geology*. – 2018. – V. 95. – P. 1–15.
34. Холодов В.Н. Геохимия осадочного процесса. Труды Геологического института. – М.: ГЕОС, 2006. – Вып. 574. – 608 с.
35. The biogeochemistry of ferruginous lakes and past ferruginous oceans / E.D. Swanner, N. Lambrecht, C. Wittkop, C. Harding, S. Katsev, J. Torgeson, S.W. Poulton // *Earth-Science Reviews*. – 2020. – V. 211. – 103430.
36. Berner R.A. A new geochemical classification of sedimentary environments // *Journal of Sedimentary Petrology*. – 1981. – V. 51. – № 2. – P. 359–365.
37. The rate and mechanism of deep-sea glauconite formation at the Ivory Coast-Ghana Marginal Ridge / A. Baldermann, L.N.L.N. Warr, G.H.G.H. Grathoff, M. Dietzel // *Clays and Clay Minerals*. – 2013. – V. 61 (3). – P. 258–276.
38. Golubovskaya E.V. Geochemistry of oolitic iron ores of different facies in the northern Aral region // *Lithology and Mineral Resources*. – 2005. – № 2 (40). – P. 187–190.
39. Origin of Oligocene channel ironstones of Lisakovsk deposit (Turgay depression, northern Kazakhstan) / M. Rudmin, N. Kalinina, S. Banerjee, I. Reva, E. Kondrashova, A. Kanaki, Y. Trubin, A. Baldermann, A. Mazurov // *Ore Geology Reviews*. – 2021. – V. 138. – P. 104–391.
40. Discriminating between different genetic types of marine ferromanganese crusts and nodules based on rare earth elements and yttrium / M. Bau, K. Schmidt, A. Koschinsky, J. Hein, T. Kuhn, A. Usui // *Chemical Geology*. – 2014. – V. 381. – P. 1–9.
41. Choi J.H., Hariya Y. Geochemistry and depositional environment of Mn oxide deposits in the Tokoro Belt, northeastern Hokkaido, Japan // *Economic Geology*. – 1992. – V. 87. – P. 1265–1274.
42. Toth J.R. Deposition of submarine crusts rich in manganese and iron // *Geological Society of America Bulletin*. – 1980. – V. 91. – P. 44–54.

Поступила 15.04.2022 г.

Информация об авторах

Максимов П.Н., аспирант Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Рудмин М.А., кандидат геолого-минералогических наук, доцент отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 553.08:553.21:553.25:553.31

MINERALOGICAL AND GEOCHEMICAL FEATURES OF UPPER CRETACEOUS MARINE IRONSTONES OF THE AYAT FORMATION (TURGAY DEPRESSION)

Prokopy N. Maximov¹,
pnm1@tpu.ru, yakutprosh@gmail.com

Maxim A. Rudmin¹,
rudminma@tpu.ru

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

The relevance. The formation of ooidal ironstones has been the subject of many scientific discussions for a long time.

The purpose of this work is to study the mineralogical and geochemical features of ooidal ironstone to access the sedimentation and geochemical conditions of their formations.

The methods: petrographic analysis, scanning electron microscopy, transmission electron microscopy, X-ray fluorescence analysis, mass spectrometry with inductively coupled plasma.

The paper introduces the mineralogical and geochemical characteristic of the Ayat Formation indicating their diagenetic origin in a coastal marine environment. The presence of various authigenic minerals, such as glauconite, apatite, pyrite, wurtzite, barite, siderite, indicates the fluctuations of the geochemical conditions during the diagenesis of marine sediments. The formation of pyrite and wurtzite was controlled by oxygen-depleted conditions with the bacterial sulfate reduction at the water-sediment interface. The association of goethite, siderite, berthierine, wurtzite, pyrite and barite among iron-rich ooids indicates a single process of their input. According to mass spectrometry, the average total content of rare earth elements was 83,1 ppm, while there is a general deficit of La, Ce, Pr, Nd. The behavior of rare earth elements and microelements has similar features for marine ironstones of Ayat Formation and channel ironstones of Lisakovsk deposit. This indicates the same diagenetic process of ironstone formation, while the enclosing sediments have distinctive facies conditions.

Key words:

Ooidal ironstone, diagenesis, mineralogy, geochemistry, Ayat Formation, Turgay depression.

The study was funded by the Russian Science Foundation (21-17-00019 «Biogeochemical cycles, metal sources and evolution of Cretaceous-Paleogene marine ironstone deposits»).

REFERENCES

- Van Houten F.B. Bhattacharyya D.P. Phanerozoic Oolitic Ironstones – Geologic Record and Facies Model. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 1982, vol. 10, no. 1, pp. 441–457.
- Kimberley M.M. Origin of oolitic iron formations. *SEPM Journal of Sedimentary Research*, 1979, vol. 49, pp. 111–131.
- Kimberley M.M. Exhalative origins of iron formations. *Ore Geology Reviews*, 1989, vol. 5, pp. 13–145.
- Kimberley M.M. Debate about ironstone: has solute supply been surficial weathering, hydrothermal convection, or exhalation of deep fluids? *Terra Nova*, 1994, vol. 6, no. 2, pp. 116–132.
- Young T.P. Phanerozoic ironstones: an introduction and review. *Geological Society, London, Special Publications*, 1989, vol. 46, no. 1, pp. 9–25.
- Galili N., Shemesh A., Yam R., Brailovsky I., Sela-Adler M., Schuster E.M., Collom C., Bekker A., Planavsky N., Macdonald F.A., Pr at A., Rudmin M., Trela W., Stuesson U., Heikoop J.M., Aurell M., Ramajo J., Halevy I. The geologic history of seawater oxygen isotopes from marine iron oxides. *Science*, 2019, vol. 365, pp. 469–473
- Jiang C.Z., Halevy I., Tosca N.J. Kinetic isotope effect in siderite growth: Implications for the origin of banded iron formation siderite. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2022, vol. 322, pp. 260–273.
- Rudmin M., Roberts A., Horg C-S., Mazurov A., Savinova O., Ruban A., Kashapov R., Veklich M. Ferrimagnetic iron sulfide formation and methane venting across the Paleocene-Eocene thermal maximum in shallow marine sediments, Ancient West Siberian Sea. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2018, vol. 19, pp. 1–22.
- Rudmin M., Banerjee S., Abdullayev A., Ruban A., Filimonenko E., Lyapina E., Kashapov R., Mazurov A. Ooidal ironstones in the Mesozoic sequences in western Siberia: assessment of formation processes and relationship with regional and global earth processes. *Journal of Palaeogeography*, 2020, vol. 9, no. 1, pp. 1–21.
- Rudmin M., Banerjee S., Mazurov A. Compositional variation of glauconites in Upper Cretaceous-Paleogene sedimentary iron-ore deposits in South-eastern Western Siberia. *Sedimentary Geology*, 2017, vol. 355, pp. 20–30.
- Belous N.C., Nikolaeva I.V., Kazansky Y.P., Berdnikov A.P., Klyarovskiy V.M., Kuznetsov V.P., Babin A.A. *Zapadno-Sibirskiy zhelezorudny basseyin* [The Western-siberian Iron Ore Basin]. Novosibirsk, Siberian Branch of the Academy of Sciences of the USSR, 1964. 448 p.
- Baioumy H., Omran M., Fabritius T. Mineralogy, geochemistry and the origin of high-phosphorus oolitic iron ores of Aswan, Egypt. *Ore Geology Reviews*, 2017, vol. 80, pp. 185–199.
- Di Bella M., Sabatino G., Quartieri S., Ferretti A., Cavalazzi B., Barbieri R., Foucher F., Messori F., Italiano F. Modern iron ooids of hydrothermal origin as a proxy for ancient deposits. *Scientific Reports*, 2019, vol. 9, no. 1, pp. 1–10.
- Rudmin M., Mazurov A., Banerjee S. Origin of ooidal ironstones in relation to warming events: Cretaceous-Eocene Bakchar deposit, south-east Western Siberia. *Marine and Petroleum Geology*, 2019, vol. 100, pp. 309–325.
- Pavlov D.I. Svyaz osadochnykh mestorozhdeniy zheleza i margantsa s neftegazonosnymi basseynami [Communication of sedimentary deposits of iron and manganese with oil and gas basins]. *Geology of ore deposits*, 1989, vol. 2, pp. 80–91.
- Pavlov D.I., Gorzhevsky D.I., Goleva G.A., Kalinko M.K., Kartsev A.A., Lipaeva A.V. Sopryazhennost rudo- i nefteobrazuyushchikh sistem v osadochnykh basseynakh i prognoz rudnykh mestorozhdeniy [The conjugation of ore and oil-forming systems in sedimentary basins and the forecast of ore deposits]. *Geology of ore deposits*, 1991, vol. 5, pp. 39–45.
- Boitsova E.P., Mazina E.A., Mikhailov B.M., Ovechkin N.K. Geologiya yugo-zapadnoy chasti Turgayskogo progiba [Geology of the south-western part of the Turgay depression]. *Trudy vsesoyuznogo nauchno-issledovatel'skogo geologicheskogo instituta VSEGEI ministerstva geologii i okhrany nedr* [Proceedings of the

- All-Union Scientific Research Geological Institute VSEGEI of the Ministry of Geology and Mineral Protection]. Moscow, Gosgeoltekhnizdat Publ., 1955. Vol. 5, pp. 152.
18. Naidin D.P. Razrez verkhnego mela Kushmurun, Torgayskiy proliv [Upper Cretaceous section of Kushmurun, Torgai Strait]. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 4 Geologiya*, 2006, vol. 4, pp. 3–9.
 19. Iakovleva A.I., Brinkhuis H., Cavagnetto C. Late Palaeocene–Early Eocene dinoflagellate cysts from the Turgay Strait, Kazakhstan; correlations across ancient seaways. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2001, vol. 172, pp. 243–268.
 20. Formozova L.N. *Zheleznyye rudy Severnogo priaralya* [Iron ores in the Northern Aral Region]. Moscow, USSR Academy Science Publ., 1959. Vol. 20, 444 p.
 21. Krotov B.P. Genezis Ayatskogo mestorozhdeniya [Genesis of the Ayat deposit]. *Oolitovye burye zheleznyaki Kustanayskoy oblasti i puti ikh ispolzovaniya* [Oolitic brown ironstones of the Kustanai region and ways of their use]. Moscow, AN SSSR Publ., 1956. pp. 88–124.
 22. *Geologiya SSSR. T. 34. Turgayskiy progib. Ch. 2. Poleznye iskopaemye* [Geology of the USSR. Vol. 34. Turgai depression. P. 2. Minerals]. Ed. by G.M. Teterev. Moscow, Nedra Publ., 1975. 304 p.
 23. Taylor S.R., McLennan S.M. *The continental crust: its composition and evolution. An examination of the geochemical record preserved in sedimentary rocks*. Oxford, Blackwell, 1985. 312 p.
 24. Nikolaeva I.V. *Mineraly gruppy glaukonita v osadochnykh formatsiyakh* [Minerals of the glauconite group in sedimentary formations]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1977. 284 p.
 25. Banerjee S., Bansal U., Vilas Thorat A. A review on palaeogeographic implications and temporal variation in glaucony composition. *Journal of Palaeogeography*, 2016, vol. 5, no. 1, pp. 43–71.
 26. Baldermann A., Banerjee S., Czuppon G., Dietzel M., Farkaš J., Löhr S., Moser U., Scheibhofer E., Wright N., Zack Th. Impact of green clay authigenesis on element sequestration in marine settings. *Nature Communications*, 2022, vol. 13, no. 1, pp. 1–11.
 27. Amorosi A. The occurrence of glaucony in the stratigraphic record: Distribution patterns and sequence-stratigraphic significance. *Rendiconti Online Societa Geologica Italiana*, 2012, vol. 20, pp. 1–6.
 28. Berner R.A. Sedimentary pyrite formation: an update. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1984, vol. 48, pp. 605–615.
 29. Merinero R., Cárdenes V. Theoretical growth of framboidal and sunflower pyrite using the R-package frambgrowth. *Mineralogy and Petrology*, 2018, vol. 112 pp. 577–589.
 30. Wilkin R.T., Barnes H.L., Brantley S.L. The size distribution of framboidal pyrite in modern sediments: An indicator of redox conditions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1996, vol. 60, pp. 3897–3912.
 31. Morse J.W., Luther G.W. Chemical influence on trace metal-sulphide interactions in anoxic sediments. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1999, vol. 63, pp. 3373–3378.
 32. Robbins L.J., Lalonde S.V., Saito M.A., Planavsky N.J., Mloszewska A.M., Pecoits E., Scott C., Dupont C.L., Kappler A., Konhauser K.O. Authigenic iron oxide proxies for marine zinc over geological time and implications for eukaryotic metallome evolution. *Geobiology*, 2013, vol. 11, pp. 295–306.
 33. Núñez-Useche F., Canet C., Liebetrau V., Puig T.P., Ponciano A.C., Alfonso P., Berndt C., Hensen C., Mortera-Gutierrez C., Rodríguez-Díaz A.A. Redox conditions and authigenic mineralization related to cold seeps in central Guaymas Basin, Gulf of California. *Marine and Petroleum Geology*, 2018, vol. 95, pp. 1–15.
 34. Kholodov V.N. Geokhimiya osadochnogo protsessa [Geochemistry of the sedimentary process]. *Trudy Geologicheskogo instituta* [Proceedings of the Geological Institute]. Moscow, GEOS Publ., 2006. Iss. 574, 608 p.
 35. Swanner E.D., Lambrecht N., Wittkop C., Harding C., Katsev S., Torgeson J., Poulton S.W. The biogeochemistry of ferruginous lakes and past ferruginous oceans. *Earth-Science Reviews*, 2020, vol. 211, 103430.
 36. Berner R.A. A new geochemical classification of sedimentary environments. *J. Sediment*, 1981, vol. 51, pp. 359–365.
 37. Baldermann A., Warr L.N.L.N., Grathoff G.H.G.H., Dietzel M. The rate and mechanism of deep-sea glauconite formation at the Ivory Coast-Ghana Marginal Ridge. *Clays and Clay Minerals*, 2013, vol. 61 (3), pp. 258–276.
 38. Golubovskaya E.V. Geochemistry of oolitic iron ores of different facies in the northern Aral region. *Lithology and Mineral Resources*, 2005, no. 2 (40), pp. 187–190.
 39. Rudmin M., Kalinina N., Banerjee S., Reva I., Kondrashova E., Kanaki A., Trubin Y., Baldermann A., Mazurov A. Origin of Oligocene channel ironstones of Lisakovsk deposit (Turgay depression, northern Kazakhstan). *Ore Geology Reviews*, 2021, vol. 138, pp. 104–391.
 40. Bau M., Schmidt K., Koschinsky A., Hein J., Kuhn T., Usui A. Discriminating between different genetic types of marine ferromanganese crusts and nodules based on rare earth elements and yttrium. *Chemical Geology*, 2014, vol. 381, pp. 1–9.
 41. Choi J.H., Hariya Y. Geochemistry and depositional environment of Mn oxide deposits in the Tokoro Belt, northeastern Hokkaido, Japan. *Economic Geology*, 1992, vol. 87, pp. 1265–1274.
 42. Toth J.R. Deposition of submarine crusts rich in manganese and iron. *Geological Society of America Bulletin*, 1980, vol. 91, pp. 44–54.

Received: 15 April 2022.

Information about the authors

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

Maxim A. Rudmin, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 696.13

ГЕОФИЗИЧЕСКИЙ И ТЕПЛОВЫЙ АНАЛИЗ ГРУНТОВ В ЗОНАХ РАЗМЕЩЕНИЯ КАНАЛИЗАЦИОННЫХ КОЛЛЕКТОРОВ Г. САНКТ-ПЕТЕРБУРГА

Половников Вячеслав Юрьевич¹,
polovnikov@tpu.ru

Вольнин Анатолий Федорович²,
Volynin_AF@vodokanal.spb.ru

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

² Государственное унитарное предприятие «Водоканал Санкт-Петербурга»,
Россия, 191015, г. Санкт-Петербург, ул. Кавалергардская, 42.

Актуальность исследования обусловлена тем, что нормативное функционирование систем канализации городов и промышленных предприятий является залогом поддержания экологической безопасности. На канализационных коллекторах, расположенных в центральной, северной и восточной частях г. Санкт-Петербурга, происходили аварийные ситуации с выходом пльвунного грунта в коллектор при строительстве (площадь Фаберже, наб. р. Невы) или при эксплуатации с образованием крупной воронки (Рижский проспект). Над канализационными коллекторами, проходящими по набережным реки Фонтанки, канала Грибоедова и реки Мойки, происходили провалы грунта и многочисленные просадки дорожного покрытия. В результате геофизических работ на этих участках установлены пльвунные грунты, характеризующиеся очень низкими удельными электрическими сопротивлениями (менее 3 Ом·м). Такие удельные электрические сопротивления ранее не отмечались для грунтов, слагающих геологический разрез четвертичных отложений города.

Цель: геофизический и тепловой анализ грунтов в зонах размещения канализационных коллекторов г. Санкт-Петербурга, расположенных в местах аварий.

Объект: группа канализационных коллекторов г. Санкт-Петербурга, расположенных в местах аварий с выходом пльвунного грунта.

Методы. Геофизические работы выполнены методом электротомографических измерений на 18 профилях вдоль трасс коллекторов и перпендикулярно к ним и методом спектрального сейсмоакустического профилирования по 4 профилям, совмещенным с профилями электроразведки. Численный анализ процессов переноса тепла выполнен с применением обоснованной разностной сетки и шагов интегрирования по времени. Обоснованность и достоверность результатов численного анализа температурных полей в зонах размещения канализационных коллекторов следуют из проведенных проверок используемого метода на сходимость и устойчивость решений на множестве сеток, выполнения условий баланса энергии на границах области расчета, а также подтверждаются сравнением результатов с аналогичными результатами. Использовался метод конечных разностей и неявная разностная схема. Разрыв теплофизических характеристик на границах контакта между слоями и применение комбинированной системы координат являлись особенностями решения поставленной задачи.

Результаты. Проведены геофизическое исследование и анализ температурных полей грунта в зонах размещения канализационных коллекторов г. Санкт-Петербурга, расположенных в местах аварий. Показано существенное влияние канализационного коллектора на распределение температур в зоне его размещения. Теоретически подтверждена возможность развития и размножения бактерий группы психрофилов в местах прокладки канализационных коллекторов.

Ключевые слова:

Канализационный коллектор, температурное поле, математическое моделирование, геофизические работы, электрическое сопротивление грунта.

Введение

Канализационные коллекторы являются наиболее важным элементом системы водоотведения города, состоящей из канализационных сетей различного уровня – домовых, квартальных, уличных, канализационных коллекторов и канализационных насосных станций. Аварии на канализационных коллекторах способствуют разрушению дорожной сети и зданий в зоне их влияния, а также загрязнению окружающей среды.

Нормативное функционирование систем канализации городов и промышленных предприятий [1] является залогом поддержания экологической безопасности. Проблемам эксплуатации канализационных систем в настоящее время уделяется пристальное внимание во всем мире. В спектр рассматриваемых

вопросов входят не только проблемы очистки стоков [2–6] и сокращения затрат, связанных с ней [7, 8], но и задачи моделирования работы систем канализования в различных условиях [8–12].

С особой внимательностью необходимо относиться к канализационным системам, эксплуатируемым в сложных геологических условиях. В качестве ярчайшего примера можно привести город Санкт-Петербург, где можно встретить весь спектр факторов, усложняющих работу городской канализации. В геологическом разрезе Санкт-Петербурга широко развиты неустойчивые грунты – пылеватые водонасыщенные пески и супеси. Наибольшую опасность представляют «Петербургские пльвуны», отличающиеся высокой текучестью, что вызвано присутствием в них микроорганизмов, связанных с болотными отложениями.

ями, широко развитыми на территории города. Это приводит к авариям и дефектам на канализационных коллекторах и сетях (разгерметизация трубопроводов, образование просадок участков трубопроводов, приводящих к их деформациям и засорам, затруднению или прекращению стока канализационных вод).

Похожие проблемы встречаются и в других крупных городах России. Например, неустойчивые грунты стали одной из причин аварий на канализационных сетях Москвы, Нижнего Новгорода, Воронежа и Краснодара.

Дефекты на канализационных коллекторах также могут быть связаны с коррозионными процессами на внутренних стенках каналов, в результате которых образуются зоны местной коррозии [13–15]. Еще одним фактором, приводящим к дефектам внутренних поверхностей канализационных каналов, является жизнедеятельность внутриканальных микроорганизмов. Такие повреждения отмечались на канализационных коллекторах в Санкт-Петербурге [16]. Однако, в связи с тем, что внутренние стенки канализационных коллекторов покрыты защитным слоем, эти дефекты имели локальный характер и не приводили к авариям.

На канализационных коллекторах, расположенных в центральной, северной и восточной частях г. Санкт-Петербурга, происходили аварийные ситуации (рис. 1) с выходом плавунного грунта в коллектор при строительстве (площадь Фаберже, наб. р. Невы) или при эксплуатации с образованием крупной воронки (Рижский проспект). Над канализационными коллекторами, проходящими по набережным реки Фонтанки, канала Грибоедова и реки Мойки, происходили провалы грунта и многочисленные просадки дорожного покрытия [17]. В результате геофизических работ на этих участках установлены плавунные грунты, характеризующиеся существенно меньшими (чем ожидалось) удельными электрическими сопротивлениями (менее 3 Ом·м). Такие значения удельных электрических сопротивлений ранее не отмечались для грунтов, слагающих геологический разрез четвертичных отложений города. Как показано в работах [17–20], под влиянием микроорганизмов пылеватые водонасыщенные грунты приобретают повышенную текучесть, электропроводность их существенно увеличивается, что соответствует снижению удельного электрического сопротивления грунта до менее 3 Ом·м [17].



Рис.1. Провал грунта на участке аварии

Fig. 1. Soil failure at the accident site

Низкие удельные электрические сопротивления грунтов, как показано в [18, 20], могут быть вызваны продуктами жизнедеятельности бактерий группы психрофилов. Эти бактерии были установлены ранее в нескольких скважинах на глубинах от 2 до 45 м при работах в центре города в «Новой Голландии» [16]. Благоприятный интервал температур для жизнедеятельности этих бактерий составляет от 5 до 18 градусов Цельсия, а максимальное размножение бактерий происходит при температурах грунта 14–15 градусов Цельсия [18, 20].

Целью работы является геофизический и тепловой анализ грунтов в зонах размещения канализационных коллекторов г. Санкт-Петербурга, расположенных в местах аварий.

Геофизическое исследование

Геофизические исследования в зонах размещения канализационных коллекторов г. Санкт-Петербурга, расположенных в местах аварий, проведены силами Государственного унитарного предприятия «Водоканал Санкт-Петербурга» [17]. Основные результаты этих исследований состоят в следующем.

По электрическим свойствам разрез грунтов в Санкт-Петербурге характеризуется удельными электрическими сопротивлениями от 15 Ом·м (глинистые грунты) до 2000 Ом·м (пески и насыпные грунты). В результате геофизических работ на аварийных участках установлены плавунные грунты, характеризующиеся существенно низкими удельными электросопротивлениями (менее 3 Ом·м).

Низкое удельное электрическое сопротивление грунтов может быть связано с наличием в зонах размещения коллекторов бактерий группы психрофилов. Питательной средой для роста и размножения микроорганизмов являются болотные отложения [18, 20]. Территория Санкт-Петербурга до начала его застройки представляла заболоченную низменность с широким развитием торфяных отложений и высокой концентрацией микроорганизмов. В силу своей подвижности они вместе с нисходящими грунтовыми водами мигрировали в нижерасположенные горизонты грунтов до глубин 50–70 м, на те участки, где были благоприятные условия для жизни. Интервалы температур для жизнедеятельности различных типов бактерий изменяются в пределах от первых единиц до сотен градусов Цельсия.

Продуктами жизнедеятельности бактерий являются кислоты и газы (метан). Под их воздействием пески теряют свои прочностные свойства, приобретают

текучесть и превращаются в пльвуны. Тонкодисперстные грунты (супеси, суглинки и глины) в результате жизнедеятельности микробов также теряют свои прочностные свойства и превращаются в пльвуны. Удельная электрическая проводимость (величина обратная удельному электрическому сопротивлению) при росте концентрации микроорганизмов увеличивается в 10 и более раз. Этим объясняются anomalно низкие удельные электрические сопротивления грунтов на электротомографических геоэлектрических разрезах (рис. 2). Прочностные свойства таких пльвунов ухудшаются при воздействии на них динамических нагрузок. В этих случаях «спящий» пльвун «просыпается» и приобретает свойства текучей жидкости. Такие грунты вскрыты скважинами среди пылеватых водонасыщенных грунтов и изучены в нескольких районах Санкт-Петербурга.

Геофизические работы выполнены методом электротомографических измерений на 18 профилях вдоль трасс коллекторов и перпендикулярно к ним и методом спектрального сейсмоакустического профилирования по 4 профилям, совмещенным с профилями электроразведки. На рис. 2 приведен типичный электротомографический разрез грунта в зоне размещения аварийного глубинного канализационного коллектора.

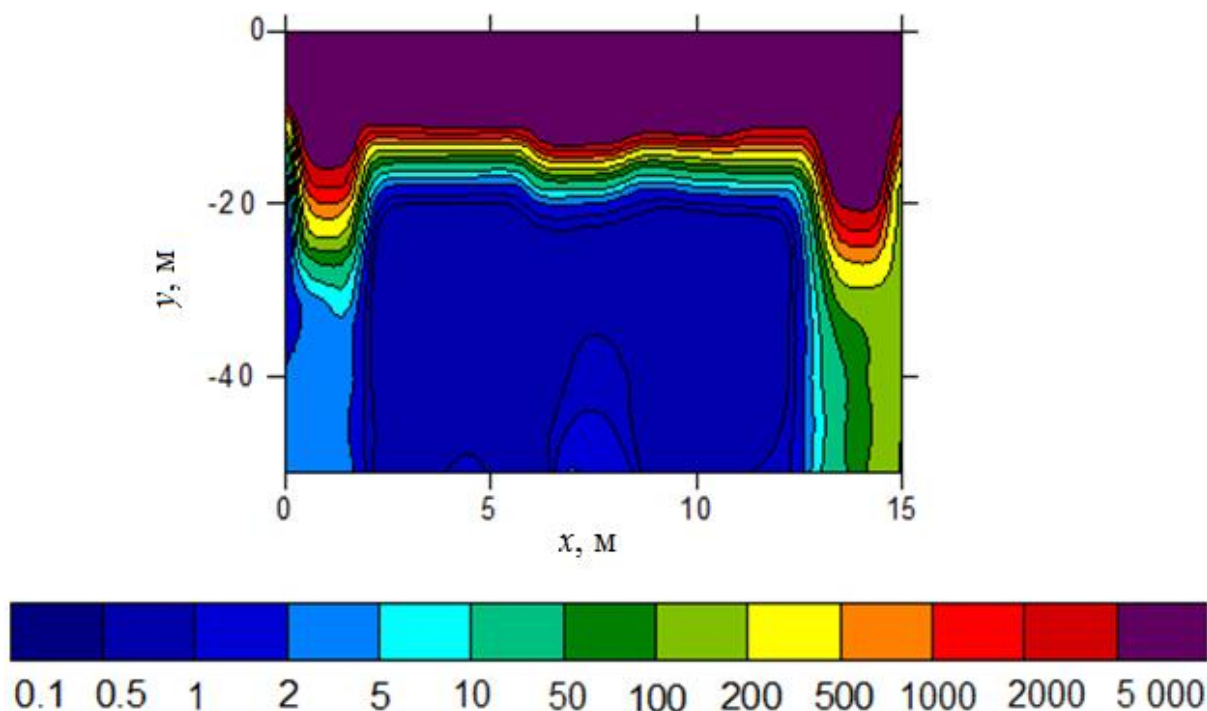


Рис. 2. Типичный электротомографический разрез грунта, Ом·м

Fig. 2. Typical electrotomographic section of the soil, Ohm·m

В результате работ выделены участки с пльвунами, характеризующиеся очень низкими удельными электросопротивлениями (ниже 1 Ом·м), расположенные в зоне канализационных коллекторов над ними, обладающие высокой текучестью, вызванной высокой концентрацией микроорганизмов. При этом установлены локальные размеры пльвунных грунтов,

которые составляют до 20 м в ширину при интервале глубин от 6 до более чем 40 м. По результатам геофизических работ принято решение о бурении проверочной скважины над канализационным коллектором на участке прогнозируемого пльвуна до глубины 45 м на одном из геофизических профилей с целью анализа грунтов на наличие микроорганизмов.

Численное моделирование

В качестве примера рассматривается типичный канализационный коллектор г. Санкт-Петербурга (рис. 3). Для этой области была решена двумерная стационарная задача теплопроводности в системе «канализационный коллектор – окружающая среда».

Основные допущения состоят в следующем:

1. Условия идеального контакта выполняются на границах слоев.
2. Свойства веществ являются известными и не зависящими от температуры величинами.
3. Процессы теплопереноса в полости канализационного коллектора не учитываются.
4. На внутренней поверхности канализационного коллектора поддерживается постоянная температура.

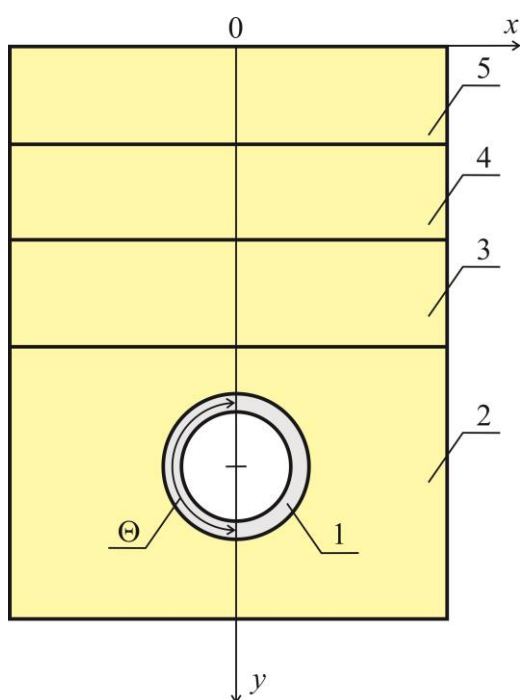


Рис. 3. Схема области решения: 1 – коллектор; 2 – грунт глинистый; 3 – грунт песчаный; 4 – супеси; 5 – суглинки и техногенный грунт (глубины слоев приведены в таблице)

Fig. 3. Scheme of the solution area: 1 – collector; 2 – clay soil; 3 – sandy soil; 4 – sandy loam; 5 – loam and technogenic soil (depth of layers are listed in the table)

Математическая модель, по аналогии с [21], представлена в следующем виде:

$$\frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2} + \frac{1}{x} \frac{\partial T_1}{\partial x} + \frac{1}{x^2} \frac{\partial^2 T_1}{\partial \Theta^2} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial^2 T_i}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_i}{\partial y^2} = 0, \quad i=1-4. \quad (2)$$

$$T_{1,к} = T_к = \text{const}. \quad (3)$$

$$\lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial x} = \lambda_j \frac{\partial T_j}{\partial x}, \quad T_i = T_j, \quad i,j=1-5; \quad i \neq j; \quad (4)$$

$$\lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial y} = \lambda_j \frac{\partial T_j}{\partial y}, \quad T_i = T_j, \quad i,j=1-5; \quad i \neq j; \quad (5)$$

$$\frac{\partial T_1}{\partial \Theta} = 0, \quad (6)$$

$$T_{5,r} = T_r = \text{const}. \quad (7)$$

$$\frac{\partial T_i}{\partial x} = 0, \quad x \rightarrow \pm\infty, \quad i=2-5; \quad (8)$$

$$\frac{\partial T_2}{\partial y} = 0, \quad y \rightarrow -\infty. \quad (9)$$

Обозначения: T – температура, К; x, y, Θ – координаты; λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К).

Индексы: 1–5 – номера областей расчета (рис. 3); к – коллектор; г – грунт.

Задача (1)–(9) решена методом конечных разностей [22]. Разрыв теплофизических характеристик на границах контакта между слоями (рис. 3) и применение комбинированной системы координат являлись особенностями этой задачи.

Моделирование выполнено для бетонного коллектора с внешним диаметром 6 м. Расстояние от поверхности грунта до оси коллектора равно 56 м.

Температура на внутренней поверхности коллектора составляла $T_к=18$ °С и соответствовала температуре канализационной жидкости. Среднегодовая температура поверхности грунта для г. Санкт-Петербурга принималась равной $T_г=2$ °С [23].

В таблице приведены характеристики рассматриваемой системы [24–26].

Таблица. Характеристики области решения задачи
Table. Characteristics of the problem solution area

Наименование/Name	Глубина слоя, м Layer depth, m	λ , Вт/(м·К) λ , W/(m·K)
Коллектор/Collector	–	1,70
Грунт глинистый/Clay soil	62	2,60
Грунт песчаный/Sandy soil	25	3,40
Супеси/Sandy loam	3,5	1,92
Суглинки и техногенный грунт Loam and technogenic soil	9,5	1,74

Численный анализ выполнен для области решения с размерами 100 м в глубину и 120 м в ширину. Этот размер области расчета выбран из условия отсутствия изменения температуры на внешнем контуре области решения (не более 0,5 %).

Типичные результаты численного анализа температурных полей в зоне размещения канализационного коллектора приведены на рис. 4.

Обоснованность и достоверность результатов численного анализа температурных полей в зонах размещения канализационных коллекторов следует из проведенных проверок используемого метода на сходимость и устойчивость решений на множестве сеток, выполнения условий баланса энергии на границах области расчета, а также подтверждается сравнением результатов с аналогичными [21].

Результаты численного исследования позволяют сделать ожидаемое заключение о том, что распреде-

ление температур на рис. 4 представляет собой изотермические линии, которые сгущаются непосред-

ственно над канализационным коллектором и более разрежены при удалении от него.

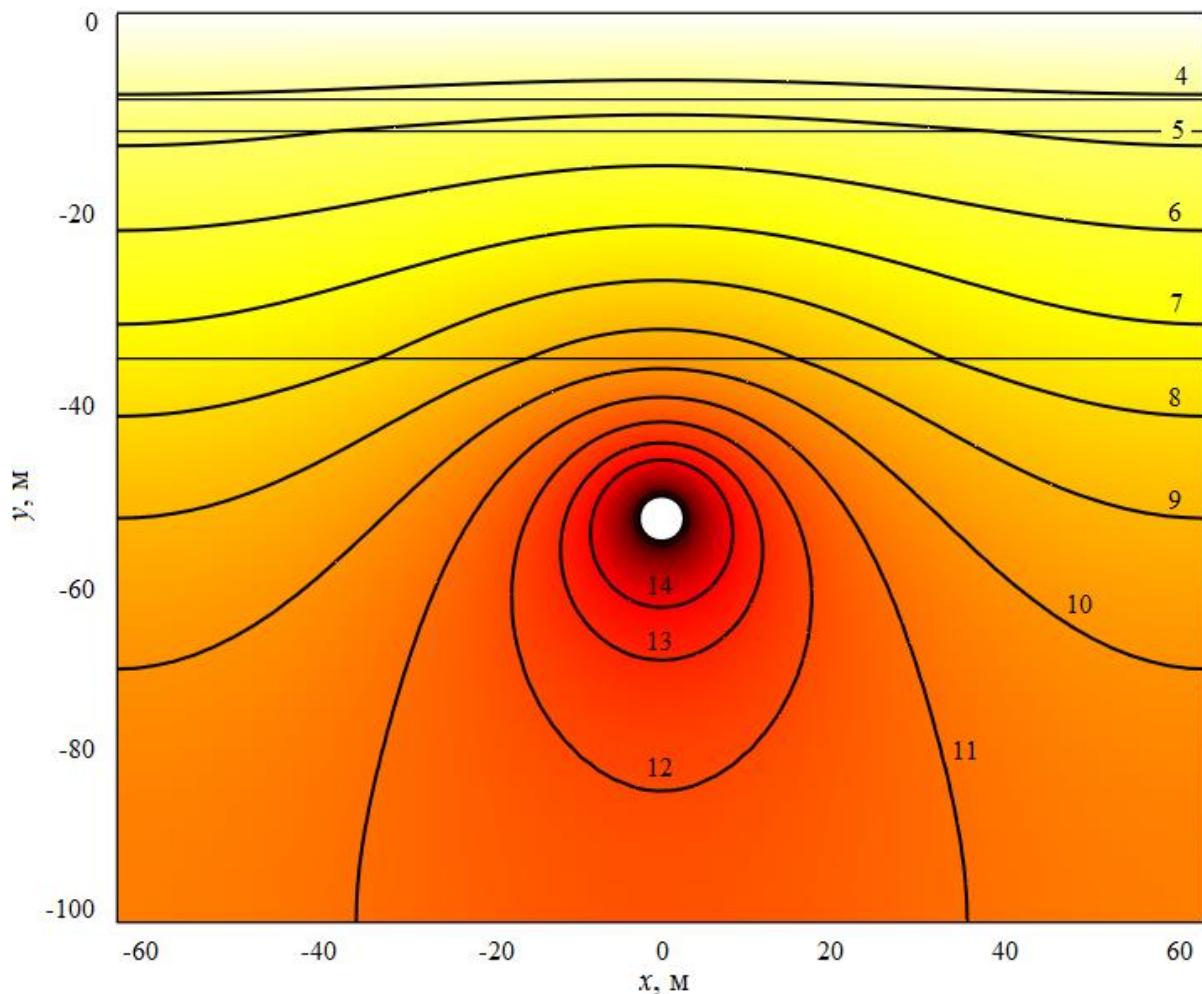


Рис. 4. Распределение температур в зоне размещения коллектора, °С

Fig. 4. Temperature distribution in the collector area, °C

Значения температур грунта в зоне размещения аварийного канализационного коллектора (рис. 4) позволяют сделать вывод о возможности развития и размножения бактерий группы психрофилов в местах прокладки.

Заключение

Проведены геофизическое исследование и анализ температурных полей грунта в зонах размещения ка-

нализационных коллекторов г. Санкт-Петербурга, расположенных в местах аварий.

Показано существенное влияние канализационного коллектора на распределение температур в зоне его размещения.

Теоретически подтверждена возможность развития и размножения бактерий группы психрофилов в местах прокладки канализационных коллекторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Wysocki L., Madryas C., Grosel J. Analysis of the structure of liners used for the modernisation of brick collectors // *Studia Geotechnica et Mechanica*. – 2021. – V. 43 (s1). – P. 501–509.
2. Bioretention systems as a part of advanced environmental treatment practice of wastewater in the city of Novi Sad / A. Durakovic, I. Mihajlovic, M. Dogo, M. Sekulic, M. Markovic, M.V. Miloradov // *Fresenius Environmental Bulletin*. – 2018. – V. 27 (1). – P. 283–290.
3. Development of biofilm collectors as passive samplers in sewerage systems – a novel wastewater monitoring method / M.E. Aydin, F. Beduk, S. Aydin, S. Koyuncu, G. Genuit, M. Bahadir // *Environmental Science and Pollution Research*. – 2020. – V. 27 (8). – P. 8199–8209.
4. Banana A.A.S., Mohamed R.M.S.R., Al-Gheethi A.A.S. Mercury pollution for marine environment at Farwa Island, Libya // *Journal of Environmental Health Science and Engineering*. – 2016. – V. 14 (1). – Article № 246.
5. Evaluation and source apportionment of heavy metals (HMs) in sewage sludge of municipal wastewater treatment plants (WWTPs) in Shanxi, China / B. Duan, F. Liu, W. Zhang, H. Zheng, Q. Zhang, X. Li, Y. Bu // *International Journal of Environmental Research and Public Health*. – 2015. – V. 12 (12). – P. 15807–15818.
6. Duan B., Feng Q. Comparison of the potential ecological and human health risks of heavy metals from sewage sludge and livestock manure for agricultural use // *Toxics*. – 2021. – V. 9 (7). – Article № 145.
7. Bugajski P., Nowobiliska-Majewska E., Majewski M. The impact of atmospheric precipitation on wastewater volume flowing into

- the wastewater treatment plant in nowy targ (Poland) in terms of treatment costs // *Energies*. – 2021. – V. 14 (13). – Article № 3806.
8. Present condition analysis and design of sewer collector recovery / R. Csicsaiová, I. Marko, J. Hrudka, I. Skultétyová, S. Stanko // *Pollack Periodica*. – 2020. – V. 15 (3). – P. 184–195.
 9. Use of continuous simulation model (COSIMAT) as a complementary tool to model sewer systems: a case study on the Paruck collector, Brussels, Belgium / E. Nkiaka, N.K. Shrestha, O.T. Leta, W. Bauwens // *Water and Environment Journal*. – 2016. – V. 30 (3–4). – P. 310–320.
 10. Predicting wastewater temperatures in sewer pipes using abductive network models / M. Abdel-Aal, M. Mohamed, R. Smits, R.E. Abdel-Aal, K. de Gussem, A. Schellart, S. Tait // *Water Science and Technology*. – 2015. – V. 71 (1). – P. 89–96.
 11. Campisano A., Creaco E., Modica C. Experimental and numerical analysis of the scouring effects of flushing waves on sediment deposits // *Journal of Hydrology*. – 2004. – V. 299 (3–4). – P. 324–334.
 12. Parker W.J., Yu J. Dynamic modeling to assess worker exposure to gas-phase volatile organic compounds in collector sewers // *Water Environment Research*. – 2001. – V. 73 (4). – P. 450–460.
 13. Effects of biofilm structures on oxygen distribution and mass transport / D. de Bee, P. Stoodley, F. Roe, Z. Lewandowski // *Biotechnology & Bioengineering*. – 1994. – V. 43 (11). – P. 1131–1138.
 14. Ellis M.B. Dematiaceous Hyphomycetes. – Kew: Commonwealth Mycological Institute, 1971. – 608 с.
 15. Devis D. Understanding biofilm resistance to antibacterial agents // *Nature Reviews Drug Discovery*. – 2003. – V. 2. – P. 114–122.
 16. Отведение и очистка сточных вод Санкт-Петербурга / под общ. ред. Ф.В. Кармазинова. – СПб: Стройиздат СПб, 1999. – 418 с.
 17. Volynin A.F. Survey of soil conditions on damage sections of the sewer collectors in St. Petersburg using electrical sounding with capacitive electrodes // *Engineering and Mining Geophysics*. – 2020. – V. 2020. – P. 1–7.
 18. Effects of microbial processes on electrolytic and interfacial electrical properties of unconsolidated sediments / G.Z. Abdel Aal, E.A. Atekwana, L.D. Slater, E.A. Atekwana // *Geophysical Research Letters*. – 2004. – V. 31 (12). – Article № L12505.
 19. Study of pollution in airports with resistivity sounding / V. Shevnin, A. Mousatov, E. Nakamura-Labastida, O. Delgado Rodriguez, J. Sanche-Osi, H. Sanchez-Osio // *Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems*. – 2003. – P. 180–189. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/Study-Of-Oil-Pollution-In-Airports-With-Resistivity-Shevnin-Mousatov/884de37849491e19bed28fcd7e76042160d779a3> (дата обращения: 15.04.2022).
 20. Dashko R.E., Alekseev I.V. Main features of engineering-geological and geotechnical research of microbiota influence on hard rocks in the urban underground space // *International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM*. – 2019. – V. 19 (1.2). – P. 369–376. URL: https://www.researchgate.net/publication/334734108_MAIN_FEATURES_OF_ENGINEERING-GEOLOGICAL_AND_GEOTECHNICAL_RESEARCH_OF_MICROBIOTA_INFLUENCE_ON_HARD_ROCKS_IN_THE_URBAN_UNDERGROUND_SPACE (дата обращения: 15.04.2022).
 21. Половников В.Ю. Тепловые режимы и тепловые потери подземных трубопроводов с учетом реальных условий теплообмена на внешнем контуре взаимодействия // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2018. – Т. 329. – № 1. – С. 124–131.
 22. Garcia A.L. Numerical methods for physics. – San Jose CA: CreateSpace Independent Publ. Platform, 2015. – 432 p.
 23. СНиП 2.01.01-82. Строительная климатология и геофизика. – М.: Стройиздат, 1983. – 57 с.
 24. Гува А.Я. Краткий теплофизический справочник. – Новосибирск: Сибвузиздат, 2002. – 300 с.
 25. Gupta H.K. Encyclopedia of solid earth geophysics – Netherlands: Springer, 2011. – 1578 p.
 26. Fundamentals of heat and mass transfer / T.L. Bergman, A.S. Lavine, F.P. Incropera., D.P. DeWitt. – NY: John Wiley & Sons, 2011. – 1048 p.

Поступила 15.04.2022 г.

Информация об авторах

Половников В.Ю., доктор технических наук, доцент Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Волынин А.Ф., руководитель геофизической группы Государственного унитарного предприятия «Водоканал Санкт-Петербурга».

UDC 696.13

GEOPHYSICAL AND THERMAL ANALYSIS OF SOILS IN THE ZONES OF LOCATION OF SEWER COLLECTORS IN ST. PETERSBURG

Viacheslav Yu. Polovnikov¹,
polovnikov@tpu.ru

Anatoliy F. Volynin²,
Volynin_AF@vodokanal.spb.ru

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

² Vodokanal of St. Petersburg,
42, Kavalergardskaya street, St. Petersburg, 191015, Russia.

The relevance of the research is related to the normative functioning of the sewer systems of cities and industrial enterprises. This is the key to ensuring environmental safety. On sewer collectors located in the central, northern and eastern parts of St. Petersburg, emergency situations occurred with the release of quicksand into the collector during construction (Faberge Square, Neva River embankment) or during operation with the formation of a large funnel (Rizhsky Avenue). Above the sewer collectors, passing along the embankments of the Fontanka River, the Griboedov Canal and the Moika River, there were soil failures and numerous subsidence of the road surface. As a result of geophysical work in these areas, quicksand soils were found, which are characterized by very low electrical resistivity (less than 3 Ohm·m). Such electrical resistivity has not previously been noted for the soils that make up the geological section of the Quaternary deposits of the city.

The main aim of the study is geophysical and thermal analysis of soils in the domains of placement of sewer collectors in St. Petersburg, located at the sites of accidents.

The object of the research is a sewer collectors in St. Petersburg, located in the places of accidents with the release of quicksand.

Methods. Geophysical work was carried out using the method of electrotomographic measurements on 18 profiles along the collector routes and perpendicular to them and by the method of spectral seismoacoustic profiling along four profiles, combined with electrical survey profiles. Numerical analysis of heat and mass transfer was executed with rational values of the grid parameters and the time integration step. The assessment of the reliability of the results of the work was carried out by testing on the example of heat transfer problems, the numerical methods used and elements of the developed algorithms for solving boundary value problems of heat and mass transfer, checking the conservatism of difference schemes, and comparing with the known data. The finite difference method and the implicit difference scheme were used. The peculiarity of the problem solving was the discontinuity of the thermophysical characteristics at the contact boundaries between the layers and the use of a combined coordinate system.

Results. A geophysical study and analysis of the temperature fields of the soil in the areas of the sewer collectors of St. Petersburg, located in the places of accidents, were carried out. A significant influence of the sewer collector on the temperature distribution in the zone of its location is shown. The possibility of development and reproduction of bacteria of the psychrophilic group in places where sewer collectors are laid has been theoretically confirmed.

Key words:

Sewer collector, temperature field, mathematical modeling, geophysical works, soil electrical resistance.

REFERENCES

1. Wysocki L., Madryas C., Grosel J. Analysis of the structure of liners used for the modernisation of brick collectors. *Studia Geotechnica et Mechanica*, 2021, vol. 43 (s1), pp. 501–509.
2. Durakovac A., Mihajlovic I., Dogo M., Sekulic M., Markovic M., Miloradov M.V. Bioretention systems as a part of advanced environmental treatment practice of wastewater in the city of Novi Sad. *Fresenius Environmental Bulletin*, 2018, vol. 27 (1), pp. 283–290.
3. Aydin M.E., Beduk F., Aydin S., Koyuncu S., Genuit G., Bahadir M. Development of biofilm collectors as passive samplers in sewerage systems – a novel wastewater monitoring method. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, vol. 27 (8), pp. 8199–8209.
4. Banana A.A.S., Mohamed R.M.S.R., Al-Gheethi A.A.S. Mercury pollution for marine environment at Farwa Island, Libya. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 2016, vol. 14 (1), Article number 246.
5. Duan B., Liu F., Zhang W., Zheng H., Zhang Q., Li X., Bu Y. Evaluation and source apportionment of heavy metals (HMs) in sewage sludge of municipal wastewater treatment plants (WWTPs) in Shanxi, China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2015, vol. 12 (12), pp. 15807–15818.
6. Duan B., Feng Q. Comparison of the potential ecological and human health risks of heavy metals from sewage sludge and livestock manure for agricultural use. *Toxics*, 2021, vol. 9 (7), Article number 145.
7. Bugajski P., Nowobilaska-Majewska E., Majewski M. The impact of atmospheric precipitation on wastewater volume flowing into the wastewater treatment plant in nowy targ (Poland) in terms of treatment costs. *Energies*, 2021, vol. 14 (13), Article number 3806.
8. Csicsaiová R., Marko I., Hrudka J., Skultétyová I., Stanko S. Present condition analysis and design of sewer collector recovery. *Pollack Periodica*, 2020, vol. 15 (3), pp. 184–195.
9. Nkiaka E., Shrestha N.K., Leta O.T., Bauwens W. Use of continuous simulation model (COSIMAT) as a complementary tool to model sewer systems: a case study on the Paruck collector, Brussels, Belgium. *Water and Environment Journal*, 2016, vol. 30 (3–4), pp. 310–320.
10. Abdel-Aal M., Mohamed M., Smits R., Abdel-Aal R.E., De Gussem K., Schellart A., Tait S. Predicting wastewater temperatures in sewer pipes using abductive network models. *Water Science and Technology*, 2015, vol. 71 (1), pp. 89–96.
11. Campisano A., Creaco E., Modica C. Experimental and numerical analysis of the scouring effects of flushing waves on sediment deposits. *Journal of Hydrology*, 2004, vol. 299 (3–4), pp. 324–334.
12. Parker W.J., Yu J. Dynamic modeling to assess worker exposure to gas-phase volatile organic compounds in collector sewers. *Water Environment Research*, 2001, vol. 73 (4), pp. 450–460.

13. De Bee D, Stoodley P., Roe F., Lewandowski Z. Effects of biofilm structures on oxygen distribution and mass transport. *Biotechnology & Bioengineering*, 1994, vol. 43 (11), pp. 1131–1138.
14. Ellis M.B. *Dematiaceous Hyphomycetes*. Kew, Commonwealth Mycological Institute, 1971. 608 p.
15. Devis D. Understanding biofilm resistance to antibacterial agents. *Nature Reviews Drug Discovery*, 2003, vol. 2, pp. 114–122.
16. *Orvedenie i ochistka stochnykh vod Sankt-Peterburga* [Disposal and treatment of wastewater in St. Petersburg]. St. Petersburg, Stroyizdat Publ., 1999. 418 p.
17. Volynin A.F. Survey of soil conditions on damage sections of the sewer collectors in St. Petersburg using electrical sounding with capacitive electrodes. *Engineering and Mining Geophysics*, 2020, vol. 2020, pp. 1–7.
18. AbdelAal G.Z., Atekwana E.A., Slater L.D., Atekwana E.A. Effects of microbial processes on electrolytic and interfacial electrical properties of unconsolidated sediments. *Geophysical Research Letters*, 2004, vol. 31 (12), Article number L12505.
19. Shevnin V., Mousatov A., Nakamura-Labastida E., DelgadoRodriguez O., Sanche-Osi J., Sanchez-Osio H., Study of pollution in airports with resistivity sounding. *Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems*. 2003. pp. 180–189. Available at: <https://www.semanticscholar.org/paper/Study-Of-Oil-Pollution-In-Airports-With-Resistivity-Shevnin-Mousatov/884de37849491e19bed28fcd7e76042160d779a3> (accessed: 15 April 2022).
20. Dashko R.E., Alekseev I.V. Main features of engineering-geological and geotechnical research of microbiota influence on hard rocks in the urban underground space. *International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM*. 2019. Vol. 19 (1.2), pp. 369–376. Available at: https://www.researchgate.net/publication/334734108_MAIN_FEATURES_OF_ENGINEERING-GEOLOGICAL_AND_GEOTECHNICAL_RESEARCH_OF_MICROBIOTA_INFLUENCE_ON_HARD_ROCKS_IN_THE_URBAN_UNDERGROUND_SPACE (accessed: 15 April 2022).
21. Polovnikov V.Y. Thermal regimes and thermal losses of underground pipelines in real heat exchange on the outer interaction boundary. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 1, pp. 124–131. In Rus.
22. Garcia A.L. *Numerical methods for physics*. San Jose CA, CreateSpace Independent Publishing Platform, 2015. 432 p.
23. *SNiP 2.01.01–82. Stroitel'naya klimatologiya i geofizika* [Building regulations 2.01.01–82. Building Climatology and Geophysics]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1983. 57 p.
24. Guva A.Ya. *Kratkiy teplofizicheskiy spravochnik* [Brief thermophysical reference book]. Novosibirsk, Sibvuzizdat Publ., 2002. 300 p.
25. Gupta H.K. *Encyclopedia of solid earth geophysics*. Netherlands, Springer, 2011. 1578 p.
26. Bergman T.L., Lavine A.S., Incropera F.P., DeWitt D.P. *Fundamentals of heat and mass transfer*. NY, John Wiley & Sons, 2011. 1048 p.

Received: 15 April 2022.

Information about the authors

Viacheslav Yu. Polovnikov, Dr. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.
Anatoliy F. Volynin, head of the geophysical group, Vodokanal of St. Petersburg.

УДК 553.9:549.02

ЛИТОЛОГО-МИНЕРАЛОГИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ СТРАТИФИКАЦИИ НИЖНЕБЕРЁЗОВСКОЙ ПОДСВИТЫ МЕДВЕЖЬЕГО И ВЫНГАПУРОВСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Ананьева Людмила Геннадьевна¹,
lga@tpu.ru

Дорошенко Александр Александрович²,
ssdoro.47@mail.ru, a.doroshenko@nedra.gazprom.ru

Дорошенко Алексей Александрович²,
alexey.doroshenko@nedra.gazprom.ru

Изосимов Дмитрий Игоревич³,
info@noyabrck-dobycha.gazprom.ru

Карымова Яна Олеговна²,
ya.karymova@nedra.gazprom.ru

Качинскас Игорь Викторович²,
i.kachinskas@nedra.gazprom.ru

Коровкин Михаил Владимирович⁴,
mvk@tpu.ru

Нерсесов Сергей Владимирович⁵,
nersesov@nadym-dobycha.gazprom.ru

Постникова Ольга Васильевна⁶,
olgapostnikova@yandex.ru

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

² ООО «Газпром ВНИИГАЗ», Россия, 625000, г. Тюмень, ул. Герцена, 70.

³ ООО «Газпром добыча Ноябрьск», Россия, 629806, г. Ноябрьск, ул. 40 лет Победы, 2.

⁴ Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36.

⁵ ООО «Газпром добыча Надым», Россия, 629736, г. Надым, ул. Зверева, 1.

⁶ Российский университет нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина, Россия, 119991, г. Москва, Ленинский пр., 65.

Актуальность. В настоящее время изучение надсеноманских отложений, в том числе и сложенных кремнистыми породами отложений нижнеберёзовской подсвиты коньяк-сантонского возраста, из разряда теоретического интереса перешло в разряд практически важных исследований. Это связано с тем, что промышленная газоносность подтверждена на шести участках (Ван-Еганский – пласт НБ₁, Вынгапуровский – НБ₄, Медвежий НБ₃–НБ₄, Ново-Часельский – НБ₃, Комсомольский НБ₁, Харампурский НБ₁). Выделяется четыре пласта нижнеберёзовской подсвиты (горизонт НБ), однако критериев определения границ этих пластов пока не выявлено. В настоящей работе дано обоснование литолого-минералогических и промыслово-геофизических критериев стратиграфического расчленения разреза нижнеберёзовской подсвиты.

Объектом исследования является берёзовская свита, отложения которой на севере Западной Сибири содержат значительные ресурсы газа, рассматриваемые как резерв «продления жизни» месторождений при выработке высокопродуктивных отложений сеномана.

Цель: повышение эффективности геологоразведочных работ по выявлению залежей газа в кремнистых породах сенона за счёт уточнения стратиграфического строения пород берёзовской свиты.

Методы. Расчленение разрезов проводилось по скважинам, пробуренным в последние годы, со сплошным отбором керн и с расширенным комплексом геофизических исследований скважин (ГИС), включающим электрические, радиоактивные, акустические, ядерно-магнитные методы. Минеральный состав определялся путём изучения керн методами рентгеноструктурного анализа (более 300 образцов), инфракрасной спектроскопии (220 образцов). Состав химических элементов в породах устанавливался методами рентгенофлуоресцентного анализа (более 300 образцов) и масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (70 образцов).

Результаты. Показано, что граница между пластами НБ₂ и НБ₃ не имеет однозначных критериев по ГИС. На Медвежьем месторождении эта граница определяется по скачкообразному изменению показаний ядерно-магнитного и акустического каротажей, на Вынгапуровском же месторождении таких скачкообразных изменений на кривых этих методов не отмечается. Показано, что граница между пластами НБ₂ и НБ₃ имеет чёткую характеристику по минеральному составу пород и определяется резким снижением доли цеолитов (клиноптилолита) при переходе от НБ₂ к НБ₃. Вместе со снижением содержания клиноптилолита на границе между пластами НБ₂ и НБ₃ происходит и резкое изменение в химическом составе пород, в частности, отмечается резкое снижение доли стронция. Такая тенденция к снижению доли клиноптилолита и стронция в породах может быть объяснена затуханием вулканической деятельности на юго-востоке Западной Сибири.

Ключевые слова:

Берёзовская свита, стратотип, пласт, силициты, кремнезем, опал, кварц, цеолит, клиноптилолит, стронций, рентгеноструктурный анализ, инфракрасная спектроскопия.

Введение

В настоящее время изучение надсеноманских отложений, в том числе и сложенных кремнистыми породами отложений нижнеберёзовской подсвиты коньяк-сантонского возраста, из разряда теоретического интереса перешло в разряд практически важных исследований. Это связано с тем, что промышленная газоносность, по данным работ [1, 2], «...подтверждена на шести участках (Ван-Еганский – пласт НБ₁, Вынгапуровский – НБ₄, Медвежий НБ₃–НБ₄, Ново-Часельский – НБ₃, Комсомольский НБ₁, Харампурский НБ₁)».

В стратиграфических решениях по верхнемеловым отложениям Западной Сибири и в опубликованных работах, посвящённых изучению отложений нижнеберёзовской подсвиты, констатируется наличие четырёх пластов в ней. Однако чёткие критерии выделения границ пластов по данным ГИС приводятся только для двух пластов: НБ₁ и НБ₄. Индексы же НБ₂ и НБ₃ оставлены как резервные для использования их в случае обнаружения газовых залежей в толще (около 40 м), расположенной между пластами НБ₁ и НБ₄. Отсутствие стратотипа для выделения пластов НБ₂ и НБ₃, возможно, связано ещё с тем обстоятельством, что для ряда месторождений граница между этими пластами на каротажных кривых практически не проявляется. В настоящее время промышленная газоносность уже подтверждена для всех четырёх пластов, поэтому возникла настоятельная необходимость выявления критериев выделения пластов НБ₂ и НБ₃, а не только НБ₁ и НБ₄.

В работе [3] приведены схемы корреляции горизонта НБ по данным ГИС с выделением только двух пластов НБ₁ (в кровельной части подсвиты) и НБ₄ (в подошвенной части подсвиты). В качестве критериев выделения этих двух пластов используются отрицательные аномалии на каротажных кривых метода собственных потенциалов (ПС) и повышенные значения, полученные электрическими методами (методом высокочастотного индукционного каротажного изопараметрического зондирования (ВИКИЗ) или методом индукционного каротажного зондирования (ИКЗ)). Индексы НБ₂ и НБ₃ оставлены в резерве «...для возможных залежей УВ сырья в средней части подсвиты...» [3]. Пласт НБ₁ является реперным для всей территории Западной Сибири и носит название пласт «кремнистых аргиллитов».

В работе [4] горизонт НБ также подразделяется на четыре пласта. При этом отмечается, что на северо-востоке Западно-Сибирской плиты (в районе нижнего течения р. Енисей) отложения коньяк-сантонского возраста сложены мелкозернистыми и крупно-мелкозернистыми алеволитами (пачка НБ₃) русско-реченской толщи, которая выклинивается в направлении с востока на запад. Именно вблизи западной границы глинизации этой толщи по данным ГИС чётко выделяются все четыре пачки (НБ₁, НБ₂, НБ₃, НБ₄), а «...на большей части Западной Сибири опоковидные глины пачки НБ₂ сливаются с кремнисто-глинистыми

отложениями пачки НБ₄ и на *диаграммах ГИС не выделяются* (курсив наш)» [4]. Таким образом, на большей части Западной Сибири по данным ГИС выделяется два пласта НБ₁ и НБ₂+НБ₄. С проявлением продуктивности в пласте НБ₃ на Ново-Часельском участке и на Медвежьем месторождении авторы цитируемой выше работы привели новые схемы корреляции, на которых пласты НБ₂ и НБ₄ уже не сливаются, а разделены пластом НБ₃, не только на востоке Западной Сибири, но и в центральной её части [5]. Во главу угла в этих корреляциях ставятся радиоактивные методы каротажа (ГК, ГГКП) и методы удельного сопотвращения пласта (ГЗ₃, ВИКИЗ). Границы пластов НБ₁ и НБ₄ у них однозначно определяются пониженными значениями ГК и ГГКП, а также повышенными значениями ГЗ₃ и не вызывают вопросов. Отметим, что пачка пород, соответствующая пласту НБ₁, в работах [4, 5] именуется как «хеяхинская пачка», которая соответствует пласту «кремнистых аргиллитов» из работы [3], и однозначно понимается на всех корреляциях из [3–5] по самым высоким значениям УЭС и самым низким значениям ГК и/или ПС. А вот для границы между пластами НБ₂ и НБ₃ таких чётких критериев в [5] не приводится. Вследствие этого положение этой границы в разрезе нижнеберёзовской подсвиты отдельно обсуждается в настоящей работе.

Методы исследования

В работе исследовались скважины, пробуренные в последние годы, со сплошным отбором керна, имеющие данные расширенного комплекса геофизических исследований скважин (ГИС), включающего электрические, радиоактивные, акустические, ядерно-магнитные методы.

Минеральный состав определялся путём изучения керна методами рентгеноструктурного анализа [6–11] (более 300 образцов), инфракрасной спектроскопии [12–15] (220 образцов). Состав химических элементов в породах определялся методами рентгенофлуоресцентного анализа [16] (более 300 образцов) и масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой [17] (70 образцов).

Для расчленения разрезов скважин газоносных отложений нижнеберёзовской подсвиты Медвежьего и Вынгапуровского месторождений использовали комплексный анализ литолого-минералогических исследований.

Экспериментальные результаты и обсуждение

Обоснование границы между пластами НБ₂ и НБ₃. Трудности определения этой границы рассмотрим на примере корреляции разрезов скважин Медвежьего и Вынгапуровского месторождений (рис. 1), расположенных на расстоянии свыше 600 км друг от друга в направлении с юго-востока на северо-запад.

Медвежье месторождение

Отметим, что в работах [18, 19] горизонт НБ Медвежьего месторождения делится не на четыре, а на три пласта – НБ₀, НБ₁, НБ₂. Критериями для опреде-

ления границ этих пластов послужили данные о минеральном составе пород и данные ядерно-магнитного и акустического каротажей (Кпо_ЯМК – общая пористость по ЯМК и DT – время пробега продольной волны) [19]. Пласт НБ₀ выделялся как первый продуктивный пласт над региональным репером НБ₁. В стратификации берёзовской свиты, предложенной в работе [5], пласт НБ₀ отнесён к верхнеберёзовской подсвите и индексируется как ВБ₃. И это правильно, поскольку кровля нижнеберёзовской подсвиты по определению совпадает с кровлей регионального репера, которым является пласт НБ₁. Следовательно, из рассматриваемых в работах [18, 19] трёх пластов к нижнеберёзовской подсвите Медвежьего месторождения относится только два – НБ₁ и НБ₂. При этом по описаниям из работы [19] интервал пласта НБ₁ характеризуется повышенными значениями пористости по ЯМК и пониженными значениями DT. По стратификации, предложенной в [17], этот интервал охватывает два пласта – НБ₁ и НБ₂ (рис. 1, скважины №№ 3С, 5С). Интервал же пласта НБ₂ из работы [19] характеризуется пониженными значениями пористости по ЯМК и повышенными DT. Он охватывает два пласта из стратификации [4] – НБ₃ и НБ₄ (рис. 1, скважины №№ 3С, 5С). Таким образом, предложенная в [5] стратификация горизонта НБ детализирует стратификацию, использованную в [18, 19].

Подчеркнём, что на Медвежьем месторождении все пласты этой детализированной стратификации имеют чётко определённые границы. Так, границы пластов НБ₁ и НБ₄ однозначно определяются по локальным отрицательным аномалиям методов ГК и ГГКП, а для НБ₁ ещё характерны и повышенные значения удельного электрического сопротивления (УЭС) (рис. 1, скважина №№ 3С, 5С). Граница между пластами НБ₂ и НБ₃ определяется по значениям DT и Кпо_ЯМК, а именно, при переходе от НБ₂ к НБ₃ значения DT ступенчато повышаются, ЯМК – ступенчато снижаются (рис. 1).

Отметим, что эта граница имеет чёткую характеристику и по данным рентгеноструктурного анализа (РСА) керна. Проиллюстрируем это на примере скважины № 5С. Здесь на глубине 1004 м происходит резкое изменение в минеральном составе пород – снижение доли опал+кристаллит+тридимит фазы кремнезёма (ОКТ-фазы) (рис. 2, а) и скачкообразное увеличение доли кварца (рис. 2, в).

С точки зрения пористости, проницаемости, плотности и других свойств горных пород зона перехода от oral-A к oral-CT (ОКТ фазы), вероятно, является наиболее стратиграфически неоднородным интервалом [20, 21]. Литологически сложно-построенные, неоднородные разрезы, включающие в себя и переходные зоны, характеризуются переменными интервалами уплотнения и пустотного пространства [18, 22].

Казалось бы, найдено решение задачи определения границы между пластами НБ₂ и НБ₃. Однако критерии, работающие на Медвежьем месторождении, совсем не срабатывают на Вынгапуровском месторождении.

Вынгапуровское месторождение

Здесь границы пластов НБ₁ и НБ₄ также однозначно определяются по локальным отрицательным аномалиям методов ГК и ГГКП и положительной аномалией УЭС (рис. 1). Кроме того, пласт НБ₁ здесь характеризуется ярко выраженными аномалиями на кривых акустического (DT) и ядерно-магнитного (Кпо_ЯМК) каротажей (рис. 1). Для границы же между пластами НБ₂ и НБ₃ таких чётких критериев не устанавливается. Из рис. 1 видно, что для скважин № 700 и 701 при переходе от пласта НБ₂ к НБ₃ не отмечается какого-либо ступенчатого изменения ни для стандартных методов каротажа (ГК, ГГКП, УЭС), ни на кривых из расширенного комплекса ГИС (ЯМК, DT). Фиксируется лишь некоторая тенденция увеличения значений на кривых ГК и Кпо_ЯМК, но она не носит ступенчатого характера, что могло бы послужить основанием для проведения здесь границы.

Невозможно здесь определить эту границу и по особенностям изменения по разрезу состава минералов кремнезёма (рис. 2, б, г). Так, доля ОКТ-фазы кремнезёма плавно убывает от 72 % в пласте НБ₁ до нуля в нижней части пласта НБ₄ (рис. 2, б), а доля кварца также монотонно возрастает от 8 до 60 % (рис. 2, г) и до 70 % в скважине № 700. По скважине № 5С Медвежьего месторождения использовано гораздо больше данных по минералам кремнезёма (рис. 2, а, в), чем по скважинам Вынгапуровского месторождения (рис. 2, б, г), и может возникнуть мысль о том, что границу между НБ₂ и НБ₃ на Вынгапуровском месторождении мы не видим из-за малой представительности данных.

Однако правильность вывода об отсутствии резких изменений содержания минералов кремнезёма на Вынгапуровском месторождении можно подтвердить имеющимися представительными данными по индексу кристалличности кремнистой составляющей изучаемых пород.

Низкотемпературная кристаллическая фаза α-кварца может быть определена методом инфракрасной спектроскопии. Для неё характерно наличие двойного пика инфракрасного поглощения в диапазоне 800...778 см⁻¹ [11]. Изменение отношения величины пиков инфракрасного поглощения при 778 и 796 см⁻¹ использовалось нами для оценки степени кристалличности кремнезёма [23].

Определённые по вышеописанному правилу значения индекса кристалличности представлены на рис. 3. Видно, что для скважин № 5С и 6С Медвежьего месторождения индекс кристалличности равен нулю для пласта НБ₁, в котором кремнезём представлен кварцем не более чем на 30 % (рис. 2, в), а преобладающей является ОКТ-фаза (рис. 2, а). По мере увеличения доли кварца в пласте НБ₂ начинает расти и индекс кристалличности, достигая своих максимальных значений уже в кровле пласта НБ₃ (рис. 3, а, в). Таким образом, в этих скважинах граница между пластами НБ₂ и НБ₃ чётко отбивается и по значениям данных инфракрасной спектроскопии, чего не скажешь о скважинах Вынгапуровского месторождения (рис. 3, б, г).

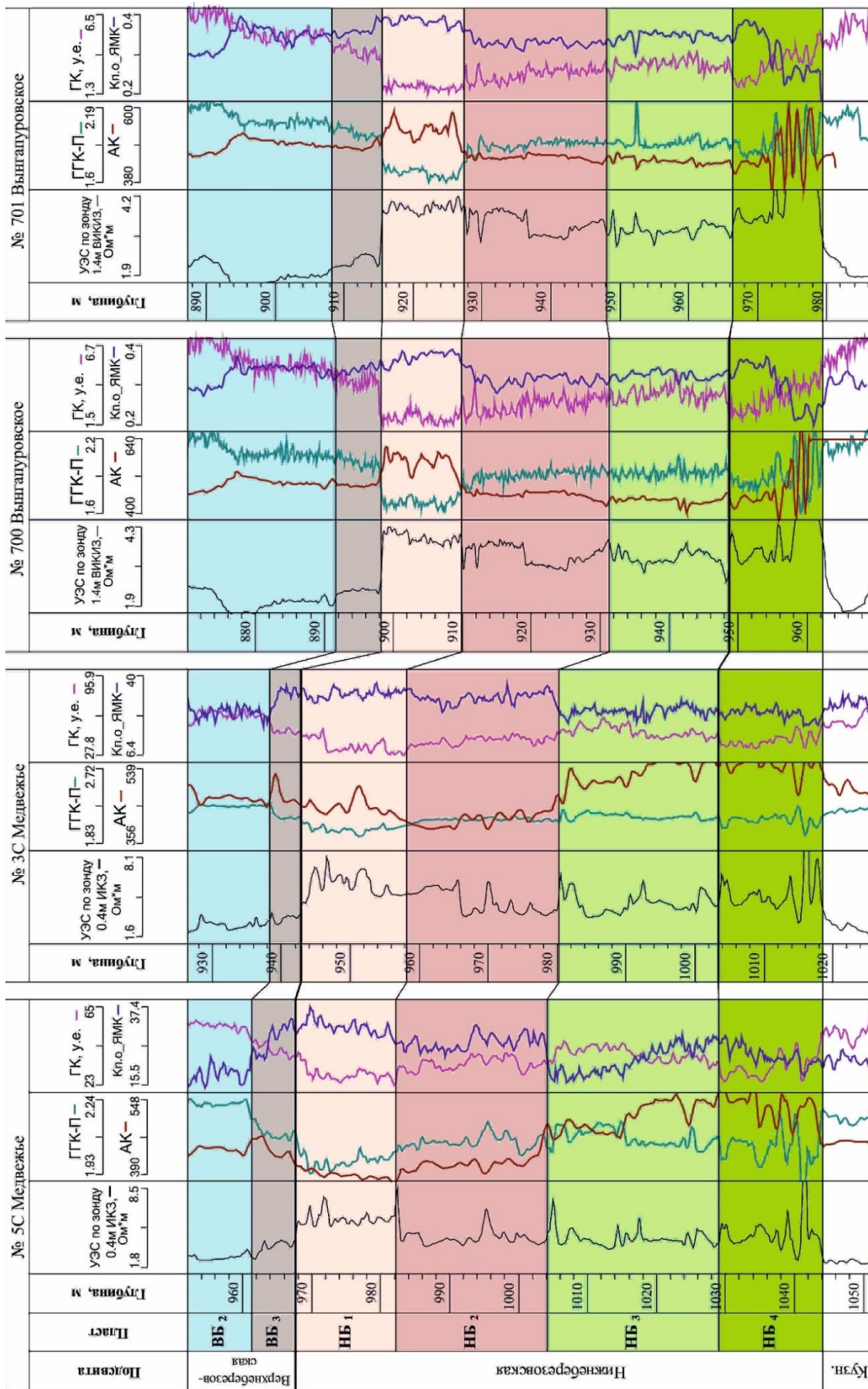


Рис. 1. Корреляция разрезов скважин Вынгауровского и Медвежьего месторождений
 Fig. 1. Correlation of sections of wells of the Vynagurovskoe and Medvezh'ye fields

Так, в скважине № 700 индекс кристалличности получает ненулевые значения только в кровле пласта НБ₄, а в скважине № 701 его значения начинают расти в нижней половине пласта НБ₄. Эти представительные данные по индексу кристалличности полностью подтверждают выводы, сделанные по данным РСА, о том,

что граница между пластами НБ₂ и НБ₃ на Вынгапуровском месторождении не может быть обоснована путём анализа изменчивости по разрезу кремнистой составляющей изучаемых пород. Отметим, что эта граница не может быть обоснована и по особенностям распределения по разрезу глинистой составляющей пород.

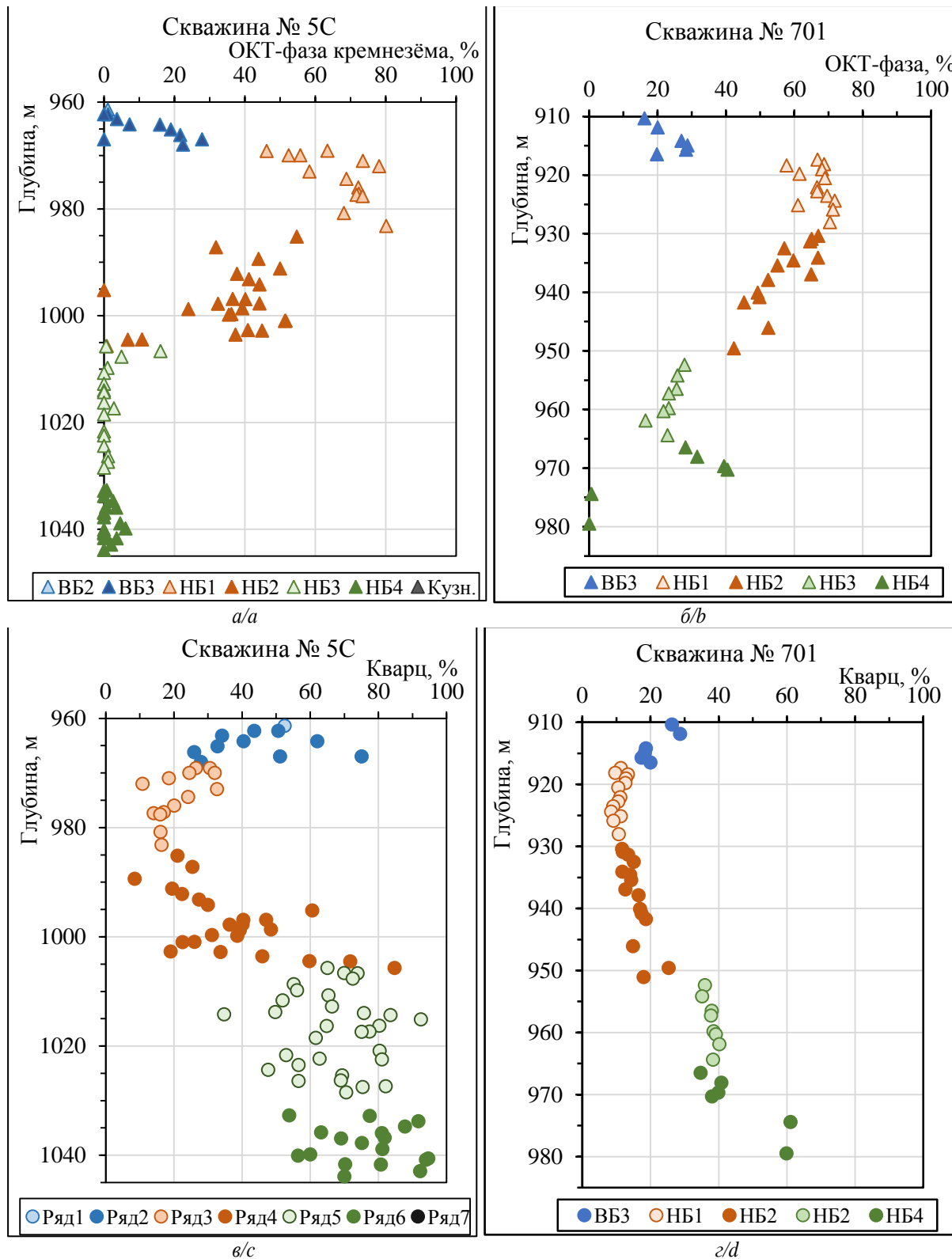


Рис. 2. Изменение содержания минералов кремнезёма по разрезам скважин № 5С и 701
Fig. 2. Changes in the content of silica minerals by well sections no. 5C and 701

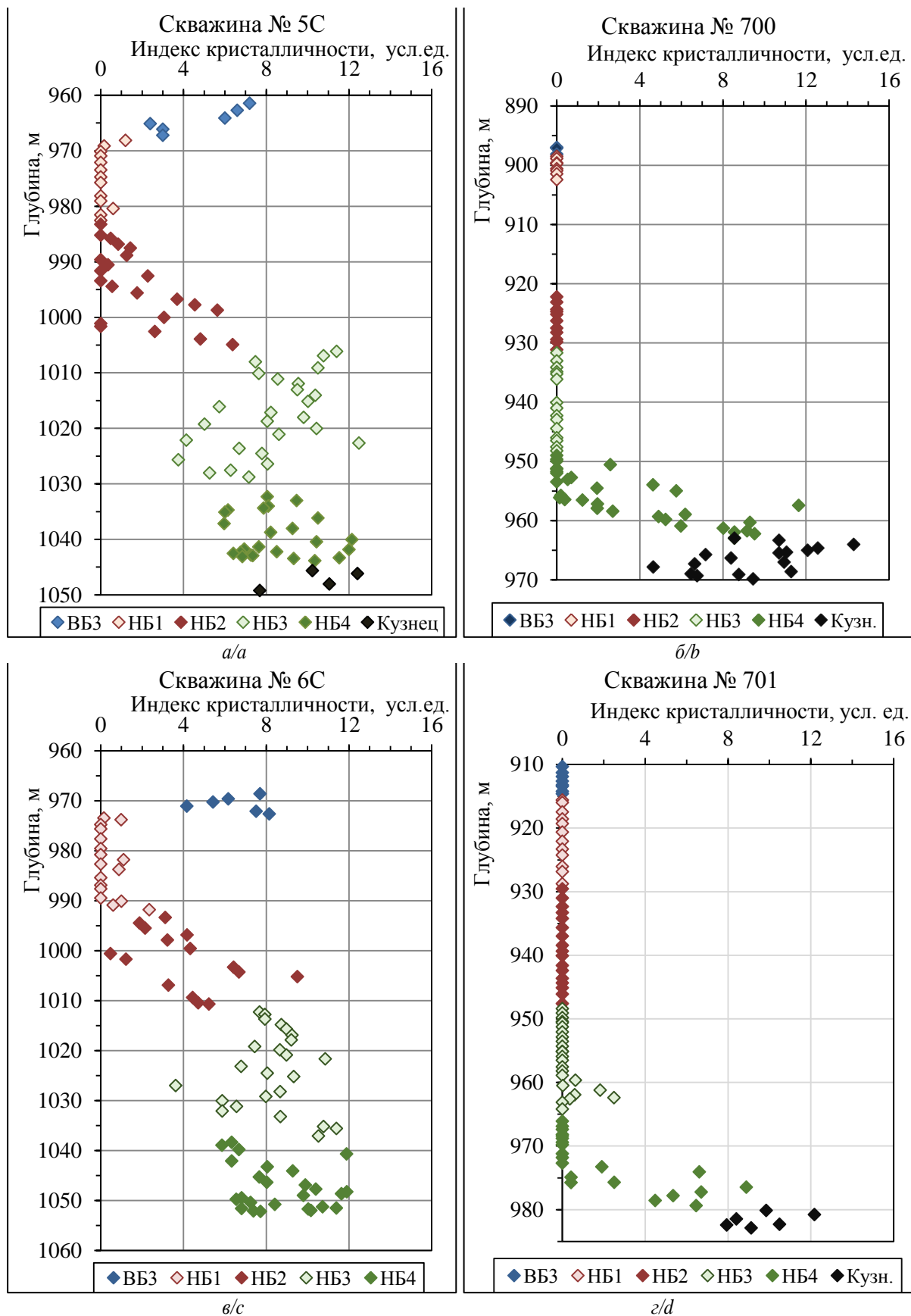


Рис. 3. Изменение индекса кристалличности по разрезам скважин Медвежьего (а, в) и Вынгапуровского (б, г) месторождений

Fig. 3. Changes of the crystallinity index along the sections of the wells of the Medvezhye (a, c) and Vyngapurovskoe (b, d) fields

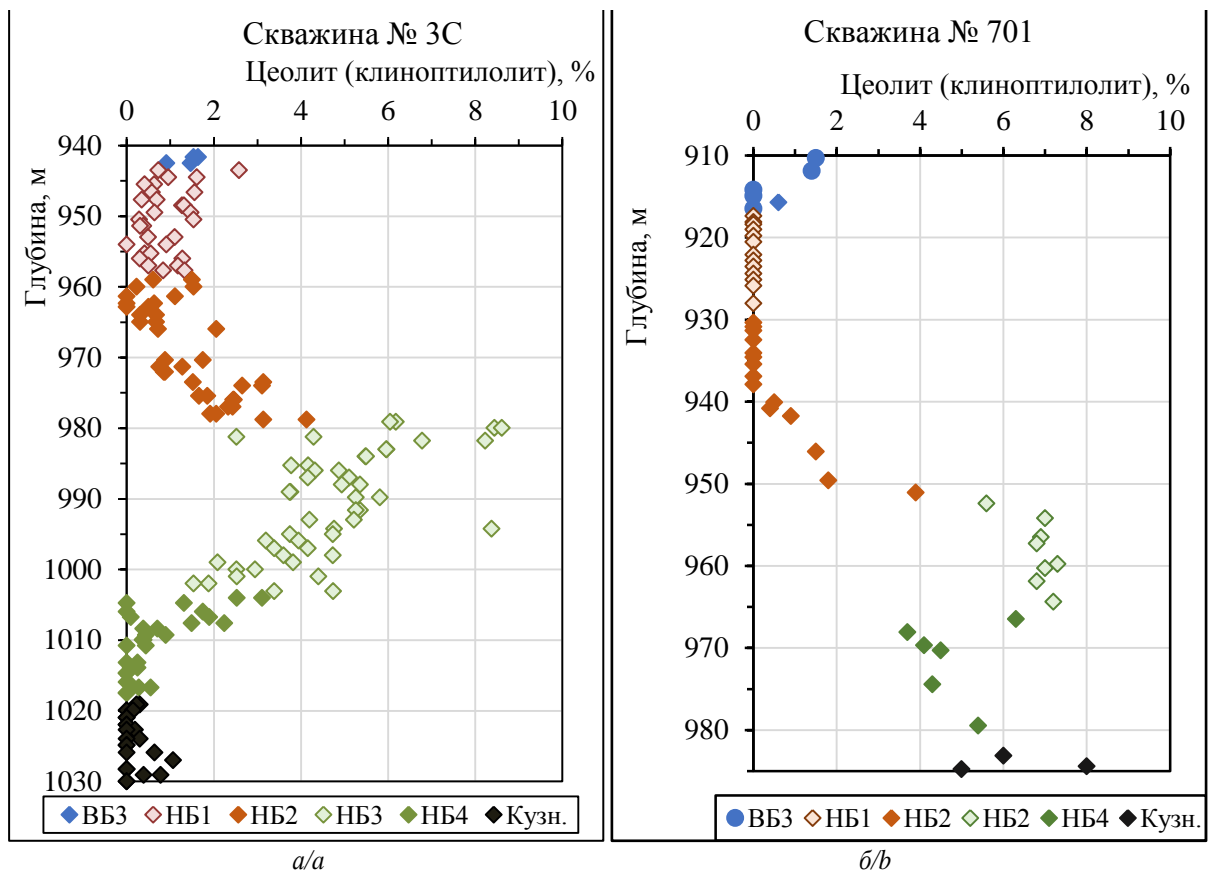


Рис. 4. Изменение содержания цеолитов по разрезам скважин № 3С и 701

Fig. 4. Changes of the content of zeolites along the sections of wells no. 3C and 701

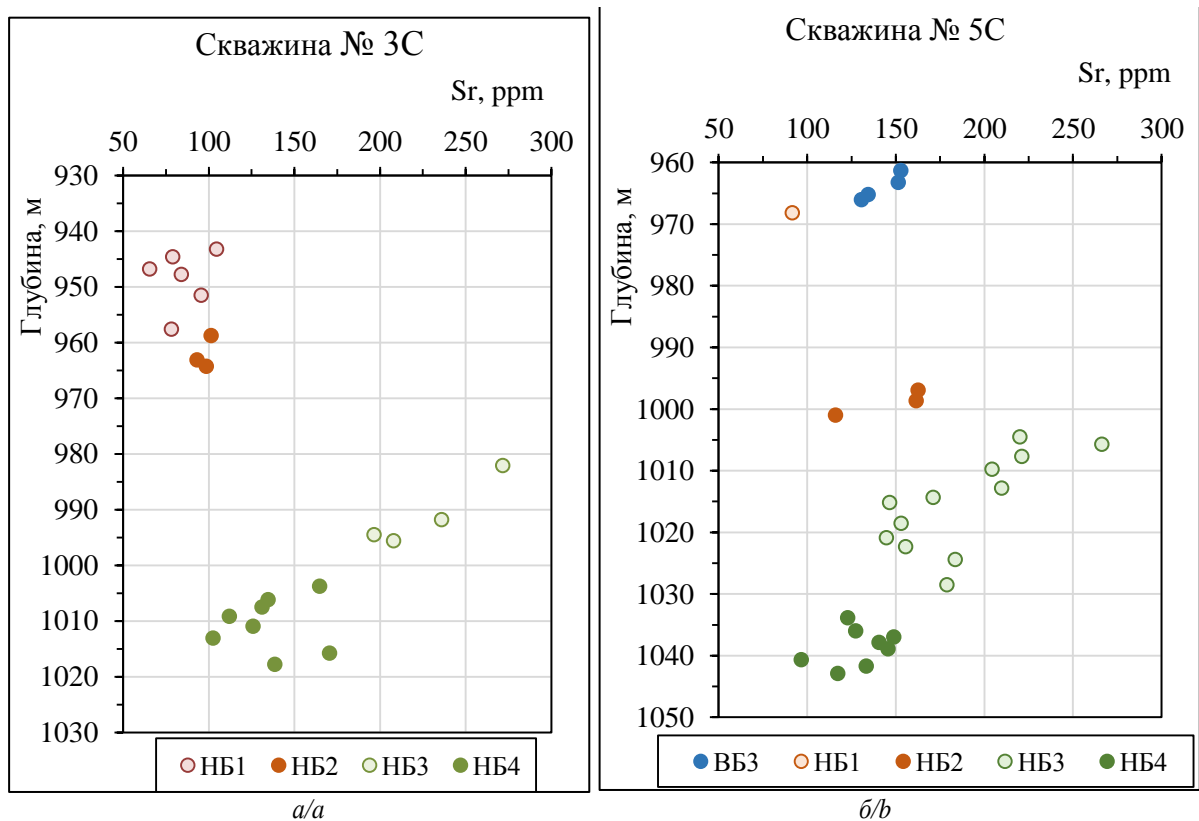


Рис. 5. Изменение содержания стронция в образцах керна скважин № 3С и 5С

Fig. 5. Changes of strontium content in core samples from wells no. 3C and 5C

Дальнейший анализ минерального состава пород горизонта НБ показал, что пласты НБ₂ и НБ₃ существенно различаются по содержанию цеолитов и на Медвежьем (рис. 4, а), и, в ещё большей степени, на Вынгапуровском месторождении (рис. 4, б).

Представленные на этом рисунке данные получены в разных лабораториях и по их заключениям цеолиты на обоих месторождениях представлены клиноптилолитом – минералом вулканогенного происхождения. В скважине № 701 содержание клиноптилолита характеризуется повышенными значениями в кузнецовской свите, в пласте НБ₄ и особенно в пласте НБ₃. На границе же пластов НБ₂ и НБ₃ происходит резкое уменьшение этого показателя, вплоть до нуля (рис. 4, б). В скважине № 3С Медвежьего месторождения увеличение доли этого минерала обнаружено несколько выше (в верхней части пласта НБ₄), но резкое уменьшение его доли происходит также на границе пластов НБ₂ и НБ₃ (рис. 4, а). Таким образом, видно, что в скважине № 701 клиноптилолит появляется исторически раньше, чем в скважине № 3С. Это говорит о том, что в кузнецовское время источник вулканогенного материала был намного ближе к Вынгапуровскому месторождению, чем к Медвежьему. Поступление вулканогенного материала на Вынгапуровском месторождении прекратилось практически мгновенно по геологическим масштабам, на границе между пластами НБ₂ и НБ₃. На Медвежьем месторождении это событие произошло также резко, но с меньшей амплитудой перепада доли цеолитов при переходе от НБ₂ к НБ₃. В последнем содержание клиноптилолита стало уменьшаться снизу вверх, но не достигло нулевых значений, как на Вынгапуровском месторождении. Такой характер изменения доли вулканогенного материала в разрезах, возможно, связан с тем, в этот период произошло затухание вулканизма со смещением зоны наиболее активных вулканов к северным широтам Западной Сибири.

В работе [24] отмечается, что цеолиты вулканического происхождения являются накопителями стронция и, следовательно, с увеличением интенсивности подводного вулканизма в осадках будет происходить увеличение доли стронция. Из рис. 5 видно, что в период формирования пластов НБ₃ и НБ₄ содержание стронция в образцах керна монотонно возрастает от 100 ppm в подошве пласта НБ₄ до 260 ppm к кровле пласта НБ₃ и при переходе к пласту НБ₂ его содержание резко падает. Отметим, что скважины № 3С и 5С отстоят друг от друга на расстоянии около 10 км, т. е. практически рядом по отношению к расстоянию до зоны вулканизма, которая находилась ближе к Вынгапуровскому месторождению, расстояние до которого (как отмечалось выше) превышает 600 км. В связи с этим характер изменчивости содержания химических элементов, связанных с деятельностью вулканов, в том числе и стронция, в этих скважинах схож между собой, что подтверждается данными по пластам НБ₃ и НБ₄. Исходя из этого можно объединить мало представительные данные по пластам НБ₂ и НБ₁ и за-

ключить, что содержание стронция в пластах НБ₂ и НБ₁ уменьшается от 160 ppm в подошве пласта НБ₂ (данные по скважине № 5С (рис. 5, б)) до 50 ppm к кровле пласта НБ₁ (данные по скважине № 3С (рис. 5, а)).

И граница между пластами НБ₂ и НБ₃ соответствует переломному моменту от возрастания содержания стронция в породах к его убыванию. По скважинам Вынгапуровского месторождения данных по содержанию стронция в породах пока не имеется, но можно ожидать, что закономерность, прослеженная по скважинам Медвежьего месторождения, будет ещё более ярко проявляться и на Вынгапуровском месторождении, как это происходит с содержанием цеолитов (рис. 4, б).

О вулканогенной природе кремнистых пород Западной Сибири коньяк-сантонского времени говорят и другие исследователи [25].

Выводы

Приведённые в статье данные и опубликованные другими исследователями материалы показывают, что пласты НБ₁ и НБ₄ нижеберёзовской свиты по всей Западной Сибири имеют чёткие границы по ГИС, определяемые отрицательными аномалиями результатов радиоактивных методов каротажа.

Они также различаются по минеральному составу: НБ₁ содержит до 80 % ОКТ-фазы (опал+кристобалит+тридимит фазы) кремнезёма, в пласте же НБ₄ эта форма кремнезёма совершенно отсутствует, а преобладающим минералом кремнезёма (80 % и более) является кварц.

Граница между пластами НБ₂ и НБ₃ не имеет однозначных критериев по данным ГИС. На Медвежьем месторождении эта граница определяется по скачкообразному изменению значений Кпо по данным ядерно-магнитного каротажа. На Вынгапуровском же месторождении таких скачкообразных изменений на кривых этих методов не отмечается.

По минеральному составу граница между пластами НБ₂ и НБ₃ определяется по резкому снижению содержания клиноптилолита, имеющего вулканогенное происхождение. Такое резкое снижение доли клиноптилолита в породах, видимо, знаменует происходящее в это время резкое затухание вулканической деятельности на юго-востоке Западной Сибири. Для краткости границу между пластами НБ₂ и НБ₃ можно характеризовать как цеолитовую.

По составу химических элементов в породах граница между пластами НБ₂ и НБ₃ определяется по переходу от роста содержания стронция к его снижению. Такая тенденция к снижению доли стронция в породах также может быть объяснена затуханием вулканической деятельности на юго-востоке Западной Сибири.

На основании литолого-минералогических исследований для газоносных отложений нижеберёзовской подсвиты Медвежьего и Вынгапуровского месторождений по комплексу признаков обосновано выделение пластов НБ₂ и НБ₃.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Нежданов А.А., Огибин В.В., Скрылев С.А. Строение и перспективность газоносности сенонских отложений севера Западной Сибири // Газовая промышленность. – 2012. – № 676. – С. 32–37.
2. Агалаков С.Е., Новосёлова М.Ю. Газоносность надсенонских отложений Западной Сибири // Известия ВУЗов. Нефть и газ. ТИУ. – 2019. – № 4. – С. 10–23.
3. Стратиграфия и индексация продуктивных пластов надсенонского газоносного комплекса Западной Сибири / С.Г. Черданцев, И.И. Нестеров, Д.А. Огнев, И.Ю. Назаренко, Н.В. Кириченко // Горные ведомости. – 2017. – № 2. – С. 14–27.
4. Кудаманов А.И., Агалаков С.Е., Маринов В.А. Трансгрессивно-регрессивный характер осадконакопления в коньяк-сантонских отложениях верхнего мела в Западной Сибири // Нефтяное хозяйство. – 2018. – № 7. – С. 58–63.
5. Новосёлова М.Ю., Агалаков С.Е., Кудаманов А.И. Характеристика верхнемеловых флюидопоров Западной Сибири // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений, 2020. – № 10 (346). – С. 35–46.
6. Казак А.В., Чугунов С.С., Чашков А.В. Комплексирование данных по текстуре и минеральному составу при исследовании породы-коллектора в отложениях берёзовской свиты // Пути реализации нефтегазового потенциала ХМАО-Югры: Материалы XXI научно-практической конференции. – Ханты-Мансийск, 2018. – С. 228–240.
7. Jones B., Renaut R.W. Microstructural changes accompanying the opal-A to opal-CT transformation: new evidence from the siliceous sinters of Geysir, Haukadalur, Iceland // Sedimentology. – 2007. – V. 54. – № 4. – P. 921–949.
8. A review of the classification of opal with reference to recent new localities / N.J. Curtis, J.R. Gascooke, M.R. Johnston, A. Pring // Minerals. – 2019. – V. 9 (5). – P. 299–313.
9. Elzeal J.M., Odom E., Miles W.J. Distinguishing well ordered opal-CT and opal-C from high temperature cristobalite by x-ray diffraction // Analytica Chimica Acta. – V. 286. – Iss. 1. – P. 107–116.
10. Smith D.K. Opal, cristobalite, and tridymite: noncrystallinity versus crystallinity, nomenclature of the silica minerals and bibliography // Powder Diffraction. – 1997. – V. 13 (01). – P. 2–19.
11. Assessment of quartz materials crystallinity by X-ray diffraction / M.V. Korovkin, L.G. Ananieva, T.S. Nebera, A.A. Antsiferova // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 110. – 2016. – V.110. – № 1. – Article № 012095.
12. Application of Fourier transform infrared spectroscopy to silica diagenesis: the Opal-A to Opal-Ct transformation / B. Rice, H. Freund, W.L. Huang, J.A. Clouse // SEPM Journal of Sedimentary Research. – 1995. – V. 65A.
13. Calculation of quartzite crystallinity index by infrared absorption spectrum / O.S. Razva, A.M. Anufrienkova, M.V. Korovkin, L.G. Ananjeva, R.N. Abramova // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2014. – V. 21. – P. 1–4.
14. Плюснина И.И. Исследование структурной неупорядоченности халцедонов методом инфракрасной спектроскопии // ДАН СССР. – 1978. – Т. 240. – № 4. – С. 839–842.
15. Gliozzo E. Variations on the silica theme: classification and provenance from Pliny to current supplies // EMU Notes in Mineralogy. – 2019. – V. 20. – Ch. 2. – P. 13–85.
16. Афонин В.П., Гуничева Т.Н., Пискунова Л.Ф. Рентгенофлуоресцентный силикатный анализ. – Новосибирск: Наука, 1984. – 227 с.
17. Гааль Л.Н., Кузьмин А.Г. Масс-спектрометрические элементный и изотопный анализы: особенности приборной реализации // Научное приборостроение. – 2002. – Т. 12. – № 3. – С. 26–30.
18. Дорошенко А.А., Карымова Я.О. Характеристика пустотного пространства опок сенонских отложений севера Западной Сибири // Экспозиция Нефть Газ. – 2017. – № 6 (59). – С. 23–27.
19. Хабибуллин Д.Я., Рыбьяков А.Н., Ситдииков Н.Р. Литолого-минералогические и промышленно-геологические критерии выделения продуктивных зон в сенонских отложениях // Газовая промышленность. – 2018. – № 8 (772). – С. 34–41.
20. Weller R., Behl R.J. Physical and mechanical characteristics of the Opal-A to Opal-CT transition zone: enhanced diatomite permeability from heterogeneous diagenetic embrittlement // Search and Discovery. – 2015. – Article № 51112.
21. Varkouhi Sh., Cartwright J.A., Tosca N.J. Anomalous compaction due to silica diagenesis – textural and mineralogical evidence from hemipelagic deep-sea sediments of the Japan Sea // Marine Geology. – 2020. – V. 426. – Article № 106204.
22. Salih Muhammad Awadha, Zaher Mundher Yaseenb. Investigation of silica polymorphs stratified in siliceous geode using FTIR and XRD methods // Materials Chemistry and Physics. – 2019. – V. 228. – P. 45–50.
23. Особенности минерального состава низкопроницаемых кремнисто-глинистых пород-коллекторов берёзовской свиты севера Западной Сибири / Л.Г. Ананьева, А.А. Дорошенко, С.С. Ильенко, Я.О. Карымова, М.В. Коровкин, Ю.А. Максимова, А.В. Пестерев, О.Н. Процкий, О.В. Савинова, М.О. Хрущева // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 12. – С.114–123.
24. Пеков И.В. Минералогия литофильных редких элементов. Барий и стронций. – М.: МГУ, 2012. – 71 с.
25. Казаринов В.П. Наши разногласия (Ответ на статью Н.М. Страхова) // Литология и полезные ископаемые. – 1965. – № 5. – С. 87–96.

Поступила 15.04.2022 г.

Информация об авторах

Ананьева Л.Г., кандидат геолого-минералогических наук, доцент отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов, Национальный исследовательский Томский политехнический университет.

Дорошенко А.А., доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник лаборатории подсчёта запасов ООО «Газпром ВНИИГАЗ».

Дорошенко А.А., кандидат технических наук, начальник центра геологического моделирования ООО «Газпром ВНИИГАЗ».

Изосимов Д.И., кандидат геолого-минералогических наук, заместитель генерального директора – главный геолог ООО «Газпром добыча Ноябрьск».

Карымова Я.О., кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник лаборатории подсчёта запасов ООО «Газпром ВНИИГАЗ».

Качинкас И.В., кандидат геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией подсчёта запасов ООО «Газпром ВНИИГАЗ».

Коровкин М.В., доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, профессор отделения нефтегазового дела Инженерной школы природных ресурсов, Национальный исследовательский Томский политехнический университет; профессор Факультета инновационных технологий, Национальный исследовательский Томский государственный университет.

Нерсесов С.В., кандидат технических наук, заместитель генерального директора – главный геолог ООО «Газпром добыча Надым».

Постникова О.В., доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры литологии Российский университет нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина.

UDC 553.9:549.02

LITHOLOGICAL AND MINERALOGICAL SUBSTANTIATION OF THE LOWER BEREZOVSKAYA SUBFORMATION STRATIFICATION OF THE MEDVEZHYE AND VYNGAPUROVSKOE DEPOSITS

Lyudmila G. Ananyeva¹,
lga@tpu.ru

Alexandr A. Doroshenko²,
ssdoro.47@mail.ru, a.doroshenko@nedra.gazprom.ru

Alexey A. Doroshenko²,
alexey.doroshenko@nedra.gazprom.ru

Dmitry I. Izosimov³,
info@noyabrck-dobycha.gazprom.ru

Yana O. Karymova²,
ya.karymova@nedra.gazprom.ru

Igor V. Kachinskas²,
i.kachinskas@nedra.gazprom.ru

Mikhail V. Korovkin^{1,4},
mvk@tpu.ru

Sergey V. Nersesov⁵,
nersesov@nadym-dobycha.gazprom.ru

Olga V. Postnikova⁶,
olgapostnikova@yandex.ru

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

² «Gazprom VNIIGAZ»,
70, Gertsen street, Tyumen, 625000. Russia.

³ «Gazprom dobycha Noyabrsk»,
2, 40 let Pobedy street, Noyabrsk, 629806, Russia.

⁴ National Research Tomsk State University,
36, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

⁵ «Gazprom dobycha Nadym»,
1, Zverev street, Nadym, 629736, Russia.

⁶ Gubkin Russian University of Oil and Gas (NIU),
65, Leninskiy avenue, Moscow, 119991, Russia.

Relevance. At present, the study of Suprasenomanian deposits, including deposits of the Lower Berezovskaya subformation of Cognac-Santonian age, composed of siliceous rocks, has moved from the category of theoretical interest to the category of practically important research. This is due to the fact that industrial gas content was confirmed at six sites (Van-Egansky – NB₁ formation, Vyngapurovsky – NB₄, Medvezhye – NB₃-NB₄, Novo-Chaselsky – NB₃, Komsomolsky – NB₁, Kharampursky – NB₁). There are four layers of the Lower Berezovskaya subformation (the NB horizon), however, criteria for determining the boundaries of these layers have not yet been identified. In this paper, the substantiation of lithological-mineralogical and commercial-geophysical criteria for stratigraphic dissection of the section of the Nizhneberez subformation is given.

The object of the study is the Berezovskaya formation, which deposits in the north of Western Siberia contain significant gas resources, considered as a reserve for «prolonging the life» of deposits during the development of highly productive Cenomanian deposits.

The aim: improving the efficiency of geological exploration to identify gas deposits in siliceous rocks of xenon by clarifying the stratigraphic structure of the rocks of the Berezovskaya formation.

Methods. The dissection of the sections was carried out on wells drilled in recent years, with continuous core sampling and with an expanded complex of geophysical studies of wells (GIS), including electrical, radioactive, acoustic, nuclear magnetic methods. The mineral composition was determined by studying the core by X-ray diffraction analysis (more than 300 samples), infrared spectroscopy (220 samples). The composition of chemical elements in rocks was determined by X-ray fluorescence analysis (more than 300 samples) and inductively coupled plasma mass spectrometry (70 samples).

Results. It is shown that the boundary between the NB₂ and NB₃ layers does not have unambiguous GIS criteria. At the Medvezhye field, this boundary is determined by the abrupt change in the readings of the nuclear magnetic and acoustic logs, at the Vyngapurovskoe field such abrupt changes in the curves of these methods are not noted. The paper shows that the boundary between the B₃ and B₂ layers has a clear characteristic of the mineral composition of rocks and is determined by a sharp decrease in the proportion of zeolites (clinoptilolite) during the transition from NB₃ to NB₂. Along with a decrease in the content of clinoptilolite at the boundary between the B₃ and B₂ layers, there is also a sharp change in the chemical composition of rocks, in particular, a sharp decrease in the proportion of strontium is noted. This tendency to decrease the proportion of clinoptilolite and strontium in rocks can be explained by the attenuation of volcanic activity in the south-east of Western Siberia.

Key words:

Berezovskaya formation, stratotype, formation, silicides, silica, opal, quartz, zeolite, clinoptilolite, strontium, X-ray diffraction analysis, infrared spectroscopy.

REFERENCES

1. Nezhdanov A.A., Ogibenin V.V., Skrylev S.A. Structure and prospects of gas content of the Senonian deposits in the north of Western Siberia. *Gas industry*, 2012, no. 676, pp. 32–37. In Rus.
2. Agalakov S.E., Novosyolova M.Yu. Gas content of the supra-Cenomanian deposits of Western Siberia. *Izvestiya VUZov. Oil and gas, TIU*, 2019, no. 4, pp. 10–23. In Rus.
3. Cherdantsev S.G., Nesterov I.I., Ognev D.A. Stratigraphy and indexation of productive strata of the supra-Cenomanian gas-bearing complex of Western Siberia. *Gornye Vedomosti*, 2017, no. 2, pp. 14–27. In Rus.
4. Kudamanov A.I., Agalakov S.E., Marinov V.A. Transgressive-regressive nature of sedimentation in the Coniac-Santonian deposits of the Upper Cretaceous in Western Siberia. *Oil Industry*, 2018, no. 7, pp. 58–63. In Rus.
5. Novoselova M.Yu., Agalakov S.E., Kudamanov A.I. Characteristics of the Upper Cretaceous seals of Western Siberia. *Geology, geophysics and development of oil and gas fields*, 2020, no. 10 (346), pp. 35–46. In Rus.
6. Kazak A.V., Chugunov S.S., Chashkov A.V. Kompleksirovanie dannyykh po teksture i mineralnomu sostavu pri issledovanii porody-kollektora v otlozheniyakh berezovskoy svity [Combination of data on texture and mineral composition in the study of the reservoir rock in the deposits of the Berzovskaya suite]. *Puti realizatsii neftegazovogo potentsiala KhMAO–Yugry. XXI konferentsiya* [Proc. of the twenty-first scientific and practical conference. Ways to realize the oil and gas potential KhMAO–Yugry]. Khanty-Mansiysk, 2018. pp. 228–240.
7. Jones B., Renaut R.W. Microstructural changes accompanying the opal-A to opal-CT transformation: new evidence from the siliceous sinters of Geysir, Haukadalur, Iceland. *Sedimentology*, 2007, vol. 54 (4), pp. 921–948.
8. Curtis N.J., Gascooke J.R., Johnston M.R., Pring A. A review of the classification of opal with reference to recent new localities. *Minerals*, 2019, vol. 9 (5), pp. 299–313.
9. Elzeal J.M., Odom E., Miles W.J. Distinguishing well ordered opal-CT and opal-C from high temperature cristobalite by x-ray diffraction. *Analytica Chimica Acta*, vol. 286, Iss. 1, pp. 107–116.
10. Smith D.K. Opal, cristobalite, and tridymite: Noncrystallinity versus crystallinity, nomenclature of the silica minerals and bibliography. *Powder Diffraction*, 1997, vol. 13 (01), pp. 2–19.
11. Korovkin M., Ananieva L., Nebera T., Antsiferova A. Assessment of quartz materials crystallinity by x-ray diffraction. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 110*, 2016, 012095.
12. Rice B., Freund H., Huang W.L., Clouse J.A. Application of Fourier transform infrared spectroscopy to silica diagenesis: the Opal-A to Opal-Ct transformation. *SEPM Journal of Sedimentary Research*, 1995, vol. 65A.
13. Razva O.S., Anufrienkova A.M., Korovkin M.V., Ananjeva L.G., Abramova R.N. Calculation of quartzite crystallinity index by infrared absorption spectrum. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2014, vol. 21, pp. 1–4.
14. Plyusnina I.I. Study of the structural disorder of chalcedony by infrared spectroscopy. *DAN SSSR*, 1978, vol. 240, no. 4, pp. 839–842. In Rus.
15. Gliozzo E. Variations on the silica theme: classification and provenance from Pliny to current supplies. *EMU Notes in Mineralogy*, 20196 vol. 20, Ch. 2, pp. 13–85.
16. Afonin V.P., Gunicheva T.N., Piskunova L.F. *Rentgenofluorescentnyy silikatnyy analiz* [X-ray fluorescence silicate analysis]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1984. 227 p.
17. Gaal L.N., Kuzmin A.G. Mass spectrometric elemental and isotope analyzes: features of instrumental implementation. *Scientific Instrumentation*, 2002, vol. 12, no. 3, pp. 26–30. In Rus.
18. Doroshenko A.A., Karymova Y.O. Characteristics of the void space of the opoks of the Senonian deposits in the north of Western Siberia. *Exposition Oil and Gas*, 2017, no. 6 (59), pp. 23–27. In Rus.
19. Khabibullin D.Ya., Rybyakov A.N., Sitdikov N.R. Lithological-mineralogical and field-geological criteria for identifying productive zones in the Senonian deposits. *Gas industry*, 2018, no. 8 (772), pp. 34–41. In Rus.
20. Weller R., Behl R.J. Physical and mechanical characteristics of the Opal-A to Opal-CT transition zone: enhanced diatomite permeability from heterogeneous diagenetic embrittlement. *Search and Discovery*, 2015, vol no, article no. 51112.
21. Varkouhi Sh., Cartwright J.A., Tosca N.J. Anomalous compaction due to silica diagenesis – textural and mineralogical evidence from hemipelagic deep-sea sediments of the Japan Sea. *Marine Geology*, 2020, vol. 426, article no. 106204.
22. Salih Muhammad Awadha, Zaher Mundher Yaseenb. Investigation of silica polymorphs stratified in siliceous geode using FTIR and XRD methods. *Materials Chemistry and Physics*, 2019, vol. 228, pp. 45–50.
23. Ananyeva L.G., Doroshenko A.A., Ilenok S.S., Karymova Y.O., Korovkin M.V., Maksimova Y.A., Pesterev A.V., Protsky O.N., Savinova O.V., Khrushcheva M.O. Features of mineral composition of low-permeable siliceous-clay reservoir rocks from the berzovskaya formation in the north of Western Siberia. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 12, pp. 114–123. In Rus.
24. Pekov I.V. *Mineralogiya litofilnykh redkikh elementov. Bariy i strontsiy* [Mineralogy of lithophilic rare elements. Barium and strontium]. Moscow, MGU Publ., 2012. 71 p.
25. Kazarinov V.P. Nashi raznoglasiya (Otvét na statyu N.M. Strakhova) [Our disagreements (Response to the article by N.M. Strakhov)]. *Lithology and Minerals*, 1965, no. 5, pp. 87–96.

Received: 15 April 2022.

Information about the authors

Lyudmila G. Ananyeva, Cand Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Alexandr A. Doroshenko, Dr. Sc., chief researcher, «Gazprom VNIIGAZ».

Alexey A. Doroshenko, Cand. Sc., head of the geological modeling center, «Gazprom VNIIGAZ».

Dmitry I. Izosimov, Cand Sc., deputy general director – chief geologist, «Gazprom dobycha Noyabrsk».

Yana O. Karymova, Cand Sc., researcher, «Gazprom VNIIGAZ».

Igor V. Kachinskas, Cand Sc., head of the laboratory for calculation of reserves, «Gazprom VNIIGAZ».

Mikhail V. Korovkin, Dr. Sc., professor, senior researcher, National research Tomsk Polytechnic University; professor, National Research Tomsk State University.

Sergey V. Nersesov, Cand Sc., deputy general director – chief geologist, «Gazprom dobycha Nadym».

Olga V. Postnikova, Dr. Sc., professor, Gubkin Russian University of Oil and Gas (NIU).

УДК 546.659:539.16: 504.06:504.53

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ^{151}Sm В ПРОБАХ ПОЧВЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА ЖИДКОСТНОЙ СЦИНТИЛЛЯЦИОННОЙ СПЕКТРОМЕТРИИ

Сальменбаев Саян Елеусизович^{1,2},
salmenbayev@nnc.kz

Берикхан Кайыржан Асетулы¹,
berikhan_kaiyrzhan@nnc.kz

Мухамедияров Нурлан Жумагазыевич¹,
mukhamediyarov@nnc.kz

Жамалдинов Фаиль Фиргатович¹,
zhamaldinov@nnc.kz

Харченко Артем Алексеевич¹,
kharchenko@nnc.kz

Мустафина Куралай Тасбулатовна¹,
kuralay@nnc.kz

¹ Филиал Института радиационной безопасности и экологии Национального ядерного центра Республики Казахстан, Казахстан, 071100, г. Курчатов, ул. Бейбит Атом, 2.

² Алтайский государственный аграрный университет, Россия, 656049, г. Барнаул, пр. Красноармейский, 98.

Актуальность исследования обусловлена отсутствием информации об уровнях содержания в почвах Семипалатинского испытательного полигона техногенного радионуклида ^{151}Sm . Расчетное количество ^{151}Sm , которое могло быть рассеяно во время наземных и атмосферных испытаний ядерных зарядов, проведенных на Семипалатинском испытательном полигоне, составляет $6,1 \cdot 10^5$ Ки. Как известно, почва является депонирующей системой, накапливающей различные токсичные, вредные вещества и радионуклиды. В результате ветровой и водной эрозии почв, поглощения радионуклидов растениями, может происходить их дальнейшее перераспределение и миграция, в результате чего радионуклиды могут поступать в организм человека, приводя к его облучению.

Цель: разработка способа радиохимического определения ^{151}Sm в почвах Семипалатинского испытательного полигона с использованием метода жидкостной сцинтилляционной спектрометрии.

Объекты: поверхностные пробы почвы, отобранные на территории Семипалатинского испытательного полигона. Основными критериями при выборе образцов было наличие в них ^{137}Cs как возможного индикатора присутствия ^{151}Sm , и отсутствие радиоактивных изотопов Eu как основного мешающего радионуклида. Значения удельной активности ^{137}Cs в исследуемых образцах варьировали от 3,6 до 780 Бк/кг.

Метод. Способ определения ^{151}Sm включает полное кислотное разложение исследуемых образцов почвы концентрированными растворами кислот (HF , HNO_3), выделение и радиохимическую очистку с использованием ионообменных смол, а также осаждение малорастворимых соединений. Удельная активность ^{151}Sm определялась с помощью ультра-низкофонового жидкостно-сцинтилляционного спектрометра Quantulus 1220. Кривая эффективности регистрации ^{151}Sm от гашения в образце была построена с использованием метода СИМАТ/NIST. Для измерения концентрации изотопов самария использовался масс-спектрометр Agilent 7700х, содержание гамма-излучателей оценивалось с помощью гамма-спектрометров BE-5030 и GEM 5825.

Результаты. Разработан способ определения ^{151}Sm в пробах почвы с использованием метода жидкостной сцинтилляционной спектрометрии. Средний химический выход составил 83 %, предел обнаружения – 0,01 Бк/г для времени измерения 60 мин. Зафиксированные значения удельной активности ^{151}Sm составили диапазон от 158 до 290 Бк/кг.

Ключевые слова:

Изотопы, радиоактивные элементы, почва, радиоактивное загрязнение, Семипалатинский испытательный полигон, ^{151}Sm , радиохимическое определение, жидкостная сцинтилляционная спектрометрия.

Введение

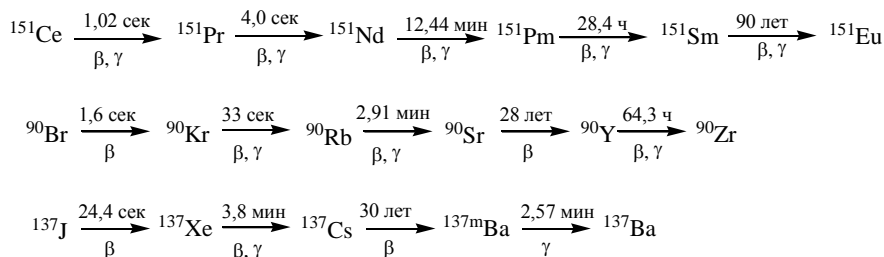
Почва является сложной и многокомпонентной системой, депонирующей различные токсиканты, в частности радиоактивные изотопы [1–9], которые могут по пищевым цепочкам попадать в организм человека [7]. Результатом ядерных испытаний, проведенных на территории Семипалатинского испытательного полигона (СИП), стало загрязнение почвенного покрова различными техногенными радионуклидами.

Одним из таких радионуклидов является ^{151}Sm с периодом полураспада порядка 90 лет [10–13]. Полный кумулятивный выход ^{151}Sm при делении изотопов ^{235}U , ^{239}Pu и ^{238}U равен 0,46, 1,29 и 0,83 % соответственно [14]. Оценочное количество ^{151}Sm , которое могло быть диспергировано в результате наземных и атмосферных испытаний на СИП, составляет $6,1 \cdot 10^5$ Ки [15].

Как известно, характер радиоактивного загрязнения почвенного покрова и его изотопный состав в значительной мере определяются параметрами ядерного испытания, а также теми физико-химическими процессами, которые протекают при взаимодействии почвенных частиц с высокотемпературной областью взрыва. В результате данного взаимодействия происходит фракционирование радионуклидов и нарушение соотношений между продуктами деления. Наиболее тугоплавкие элементы конденсируются на жидких частицах грунта и распределяются внутри частицы, а летучие элементы, или элементы, имеющие газообразных предшественников, конденсируются позже, иногда уже после затвердевания таких частиц. В результате этого крупные частицы, выпадающие из радиоактивного облака раньше, чем мелкие, оказываются обогащенными тугоплавкими изотопами, а мелкие – летучими [14].

Таким образом, следует полагать, что конденсация относительно тугоплавкого ^{151}Sm происходила рань-

ше, чем, например, ^{137}Cs или ^{90}Sr , которые имеют в своих цепочках распада инертные газы – ^{137}Xe и ^{90}Kr :



Тем не менее можно сделать предположение, что следы радиоактивных выпадений от атмосферных испытаний, обнаруженные по результатам гамма-спектрометрической съемки, могут косвенно указывать и на возможное присутствие ^{151}Sm , так как выпадение частиц должно было происходить главным образом вдоль траектории движения радиоактивного облака.

Для определения содержания ^{151}Sm могут использоваться методы жидкостной сцинтилляционной спектрометрии (ЖСС) и масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ИСП-МС). К недостаткам масс-спектрометрических измерений относится главным образом изобарное наложение изотопа ^{151}Eu [16], который присутствует в природной смеси изотопов, а также образуется в результате распада ^{151}Sm .

К недостаткам использования жидкостной сцинтилляционной спектрометрии для измерения активности ^{151}Sm относится то, что максимальная энергия бета-излучения ^{151}Sm не превышает 77 кэВ [17, 18], в то время как для большинства других бета-излучателей энергии бета-частиц могут достигать нескольких сотен и тысяч кэВ. А так как распределение бета-спектра носит непрерывный характер, то требуется проведение тщательной радиохимической очистки от всех долгоживущих бета-излучателей.

Целью исследования является разработка способа определения ^{151}Sm в пробах почвы с использованием метода ЖСС.

Объекты и методы исследования

Для отработки методики использовались поверхностные пробы почвы, отобранные на территории СИП. При выборе исследуемых образцов ориентировались на наличие в них ^{137}Cs как возможного индикатора присутствия продуктов деления, в частности ^{151}Sm , и отсутствие радиоактивных изотопов $^{152,154,155}\text{Eu}$, которые ввиду близости химических свойств и более высоких энергий β -излучения будут являться основной помехой при бета-спектрометрических измерениях. Но так как изотопы $^{152,154,155}\text{Eu}$ являются продуктами нейтронной активации грунта, их активности в основном приурочены к эпицентральной зоне ядерных взрывов и не выходят за пределы испытательных площадок. Значения удельной активности ^{137}Cs в исследуемых образцах варьировали от 3,6 до 780 Бк/кг.

Пробы почвы отбирались точечно, площадь отбора составляла 100 см², глубина отбора – 5 см. Расположение точек отбора показано на рис. 1.

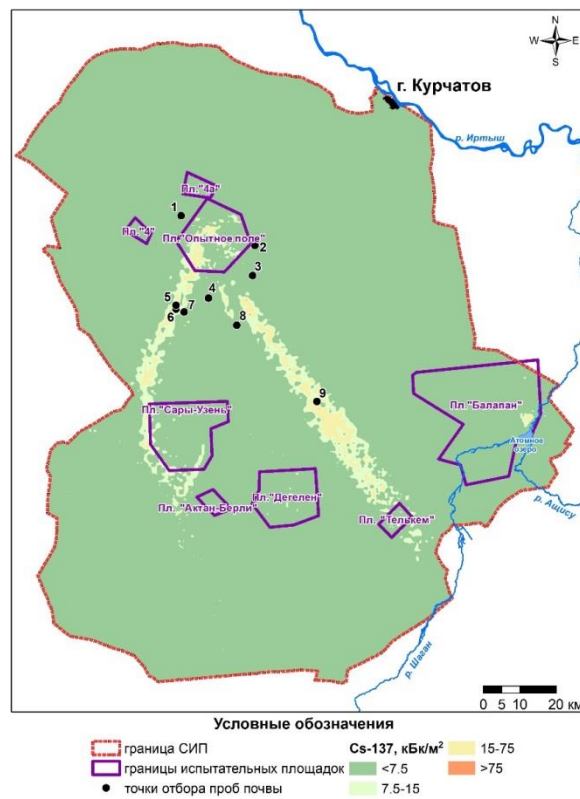


Рис. 1. Точки отбора проб
Fig. 1. Sampling points

Пробоподготовка

Из воздушно-сухих проб почвы квартованием отбирались навески массой 150–200 г, которые истирались на лабораторной мельнице до порошкообразного состояния. Из подготовленных таким образом гомогенных образцов отбирались усредненные навески массой 5 г, которые прокаливались в муфельной печи при температуре 550 °С в течение 6 часов.

Метод кислотного разложения проб почвы

Для учета потерь целевого радионуклида в анализируемые образцы предварительно вносилась добавка носителя Sm в количестве 0,5 мг. Минерализованные пробы почвы обрабатывались концентрированными растворами кислот (HF, HNO₃) и их смесями для разложения силикатной матрицы и перевода радионуклидов в растворенное состояние. Образующиеся фторидные соединения растворялись при последовательной обработке, при нагревании, растворами HNO₃ и HCl с добавлением борной кислоты (H₃BO₃).

Кислотность растворов после кислотного разложения должна соответствовать 7–8 М HNO_3 либо 8–9 М HCl для удержания изотопов Pu на анионите АВ 17·8. Однако наиболее предпочтительным выглядит проведение сорбции из среды 9 М HCl , так как в этом случае, помимо изотопов Pu , на анионите будут задерживаться ионы Fe^{3+} (что снизит степень гашения в спектрометрическом образце) и Co^{2+} (что будет иметь значение при наличии в пробах ^{60}Co).

Выделение и радиохимическая очистка

Выделение и радиохимическая очистка изотопов самария проводились с использованием методов ионного обмена и соосаждения. В общем виде схема анализа ^{151}Sm представлена на рис. 2.

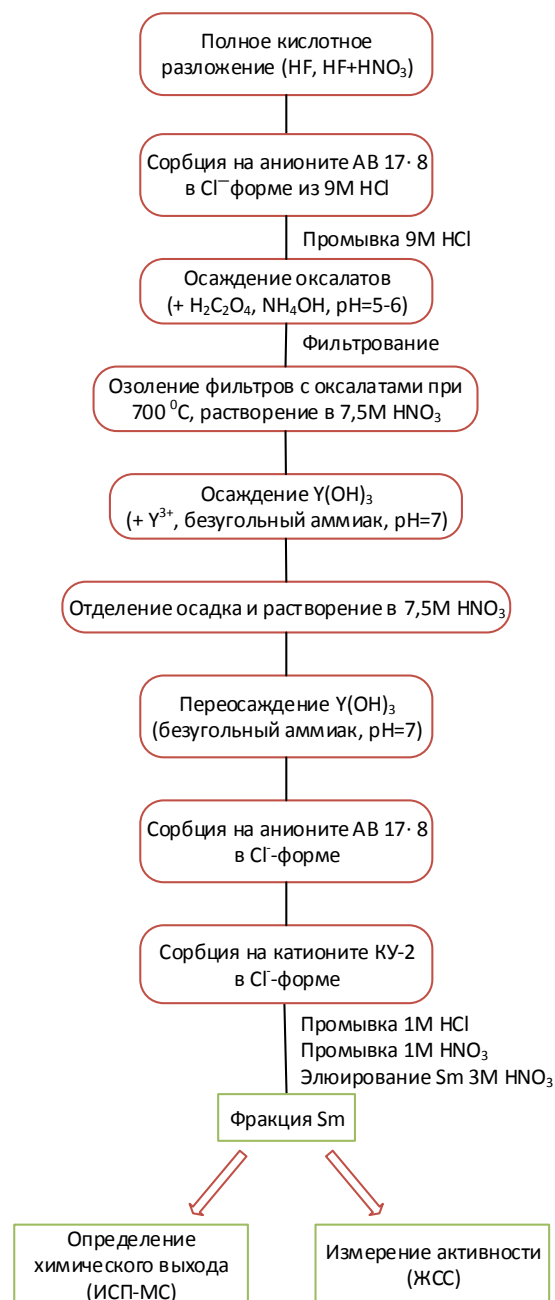


Рис. 2. Схема анализа ^{151}Sm

Fig. 2. Radiochemical procedure for determination of ^{151}Sm

Подготовка спектрометрического источника и измерение удельной активности

Перед подготовкой спектрометрического источника растворы с выделенной фракцией самария выдерживались не менее 14 дней для распада короткоживущего ^{90}Y ($T_{1/2}$ –64 ч.). Дальнейшая подготовка спектрометрического источника включала в себя: упаривание выделенной фракции Sm , растворение солевого остатка в небольшом количестве 4М HCl , количественный перенос в стеклянную сцинтилляционную вилу и смешивание с сцинтиллятором Ultima-Gold. Полученная смесь тщательно встряхивалась до полного растворения анализируемого образца и выдерживалась в темноте не менее 12 часов для устранения процессов хемилюминисценции. В качестве фонового образца использовался раствор соляной кислоты и сцинтиллятора, приготовленный аналогично анализируемым образцам. Время измерения каждого из образцов составило 60 мин.

Расчет удельной активности ^{151}Sm в исследуемых образцах производился согласно выражению:

$$A_{\text{уд.}} = \frac{(N - N_{\text{ф}}) \cdot 1000 \cdot 100\%}{m \cdot \omega\% \cdot 60 \cdot \varepsilon},$$

где N – скорость счета ^{151}Sm , имп/мин; $N_{\text{ф}}$ – скорость счета фона, имп/мин; ε – эффективность регистрации бета-частиц ^{151}Sm ; m – масса пробы, г; $\omega\%$ – химический выход носителя Sm , %.

Результаты и их обсуждение

Оценка влияния природного самария на величину химического выхода носителя

Согласно литературным данным, среднее содержание самария в почвах составляет порядка $5,7\text{--}8 \cdot 10^{-4}\%$ [19, 20], что при навеске пробы в 5 г может составить до 8 % от количества введенного носителя. В исследуемых образцах измеренное содержание природного самария варьирует от 0,3 до 0,5 мг/кг, что не превышает и 0,5 % от количества введенного носителя. Тем не менее наиболее целесообразным выглядит увеличение количества вводимого носителя до 1 мг/образец. Тогда вклад природного самария, рассчитанный относительно кларка, не будет превышать 4 %, а относительно экспериментально определенного количества – 0,25 %.

Средний химический выход Sm , согласно использованной схеме выделения (рис. 2), составил 83 %.

Оценка радиохимической очистки

Так как характер бета-спектров не позволяет идентифицировать имеющиеся в спектрометрическом образце радионуклиды, необходимо было провести оценку степени радиохимической очистки ^{151}Sm от естественных и искусственных бета-излучающих радионуклидов, период полураспада которых превышает 2 суток (^{40}K , ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{60}Co , ^{210}Pb , ^{210}Bi). Присутствие ^{40}K , ^{137}Cs , ^{60}Co и ^{210}Pb определялось по их собственным гамма-линиям, содержание ^{90}Sr оценивалось по гамма-излучателю ^{85}Sr (предварительно добавленному в образцы), наличие ^{210}Bi оценивалось по ^{214}Bi (табл. 1). Все остальные короткоживущие радионуклиды во внимание не принимались.

Таблица 1. Удельная активность гамма-излучателей во фракции самария, Бк/кг

Table 1. Specific activity of gamma-emitters in Sm-fraction, Bq/kg

^{40}K	^{214}Bi	^{137}Cs	^{60}Co	^{210}Pb	$^{85}\text{Sr}^*$
<40	<2,4	<0,8	<0,6	<7,7	5,2±0,9
<25	<1,4	<0,5	<0,4	<3,5	<1,0
<24	<1,3	<0,5	<0,4	<3,4	<0,8
<39	<2,3	<0,8	<0,5	<10	0,9±0,5
<45	<2,7	<0,9	<0,6	<9,3	<0,9

*Результаты пересчитаны с учетом распада.

*Results are given taking into account radioactive decay.

Как показывают результаты гамма-спектрометрического анализа (табл. 1), во фракции самария возможно присутствие некоторого остаточного количества изотопов стронция (так, в одном случае было обнаружено до 3,6 % от введенного количества ^{85}Sr). При этом удельные активности всех остальных рассматриваемых радионуклидов находятся ниже пределов обнаружения.

Очевидно, что той температуры, которая выделяется во время реакции нейтрализации (рис. 2), оказывается недостаточно для коагуляции и формирования крупнодисперсного осадка, что в свою очередь повлияло на степень адсорбции и захват примесных элементов, поэтому в дальнейшем следует вести осаждение $\text{Y}(\text{OH})_3$ из горячих растворов (70–80 °С). Однако, в виду того, что данная реакция протекает достаточно бурно и с разбрызгиванием раствора, необходимо использовать химические стаканы достаточной емкости. Также при переосаждении $\text{Y}(\text{OH})_3$ следует вносить в растворы добавку носителя стабильного стронция (10–20 мг), чтобы предотвратить соосаждение следовых количеств ^{90}Sr .

Построение кривой эффективности регистрации ^{151}Sm (кривой гашения)

Построение кривой зависимости эффективности регистрации ^{151}Sm от гашения в образце выполнялось с использованием метода СИМАТ/НИСТ [21–23]. Данный метод основан на сочетании теоретических расчетов, касающихся определяемого радионуклида и стандартного индикаторного радионуклида (в качестве которого выступает ^3H как наиболее подходящий), а также экспериментальных данных, которые характеризуют прибор, сцинтилляционный коктейль и определяемый радионуклид.

Последовательность получения кривой эффективности счета ^{151}Sm можно представить в виде следующих этапов:

- 1) измерение набора стандартов ^3H с различной степенью гашения (Ultima Gold Quenched Standards, с активностью 264 800 DPM) с построением зависимости эффективности счета ^3H от гашения в образце (рис. 3);
- 2) построение расчетной зависимости эффективности счета ^3H от добротности прибора (рис. 4);
- 3) построение из двух предыдущих соотношений так называемой «универсальной» кривой – зависимости добротности от гашения в образце (рис. 5);

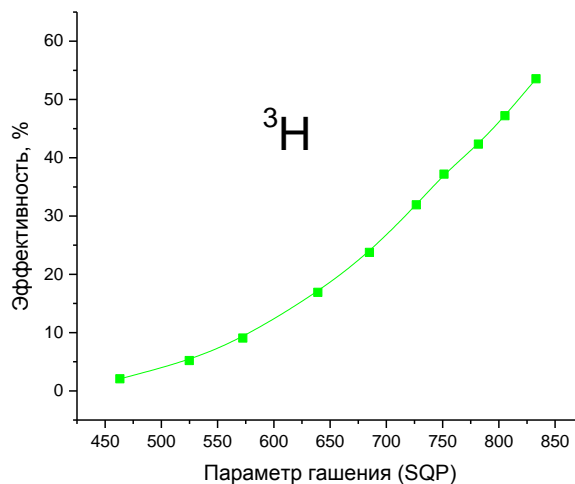


Рис. 3. Зависимость эффективности счета ^3H от гашения в образце

Fig. 3. Dependence of the ^3H counting efficiency on quenching in the sample

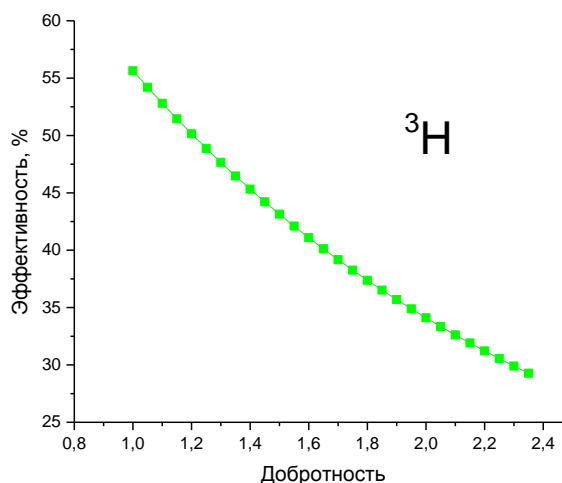


Рис. 4. Зависимость эффективности счета ^3H от добротности

Fig. 4. Dependence of the ^3H counting efficiency on free parameters

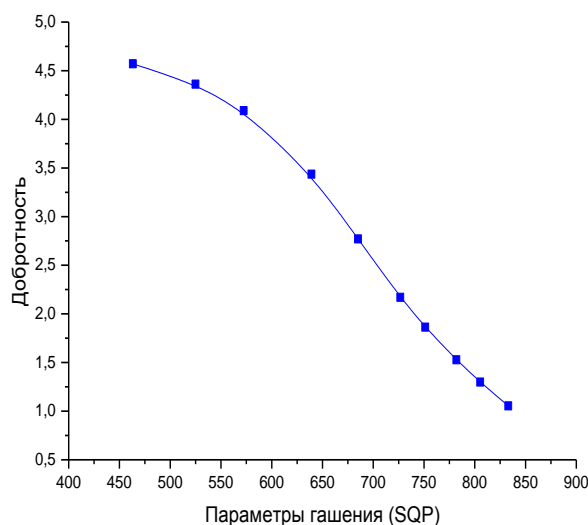


Рис. 5. Универсальная кривая

Fig. 5. Universal curve

Данная «универсальная» кривая не привязана ни к какому определенному радионуклиду и зависит только от конкретного используемого прибора и сцинтиллятора.
4) построение расчетной зависимости эффективности счета ^{151}Sm от добротности прибора (рис. 6);

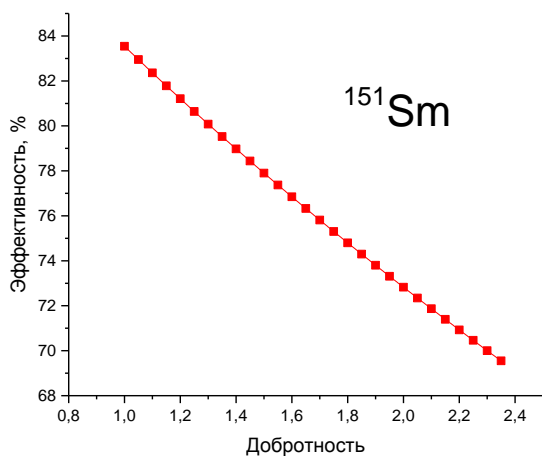


Рис. 6. Зависимость эффективности счета ^{151}Sm от добротности

Fig. 6. Dependence of the ^{151}Sm counting efficiency on free parameters

5) построение кривой гашения ^{151}Sm исходя из двух предыдущих соотношений (рис. 7).

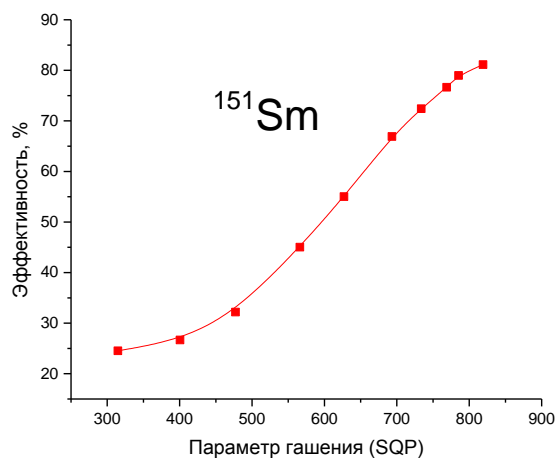


Рис. 7. Зависимость эффективности счета ^{151}Sm от гашения в образце (кривая гашения)

Fig. 7. Quench curve of ^{151}Sm

Минимально детектируемая активность (МДА)

Расчет МДА производился согласно выражению:

$$\text{МДА} = \frac{k^2 + 2k \cdot \sqrt{2N_{\phi} \cdot t}}{60 \cdot t \cdot \epsilon \cdot m}, \quad (1)$$

где k – коэффициент, определяющий уровень доверительной вероятности для измеряемой скорости счета;

m – масса пробы, г; ϵ – эффективность регистрации; N_{ϕ} – скорость счета фона, имп/мин; t – время измерения, мин.

МДА, рассчитанная согласно выражению (1), составила порядка 0,01 Бк/г для времени измерения 60 мин.

Оценка уровней содержания ^{151}Sm в поверхностных слоях почвы

Результаты радионуклидного анализа поверхностных проб почвы представлены в табл. 2.

Полученные численные значения активности ^{151}Sm находятся в диапазоне от 158 до 290 Бк/кг, что значительно ниже нормируемого уровня, составляющего для данного радионуклида $1 \cdot 10^4$ Бк/кг.

Корреляционный анализ полученных данных не позволил установить какую-либо зависимость между содержанием в почве ^{137}Cs и ^{151}Sm ($r=0,01$). Так, например, есть образцы, которые характеризуются относительно высоким содержанием ^{137}Cs и незначительным ^{151}Sm , и наоборот. Вполне вероятно, что на различие в характере поверхностного распределения ^{137}Cs и ^{151}Sm могло в значительной мере повлиять наличие у ^{137}Cs газообразных предшественников в цепочке распада.

Заключение

Разработан способ определения ^{151}Sm в пробах почвы с использованием метода жидкостной сцинтилляционной спектрометрии. Схема радиохимического выделения и очистки основана на последовательном ионном обмене и осаждении малорастворимых соединений. В ходе проведенных работ проанализировано влияние природного самария на химический выход носителя, проведена оценка радиохимической очистки ^{151}Sm от мешающих бета-излучателей, построена кривая эффективности регистрации ^{151}Sm от гашения в образце, проведен анализ проб почвы, отобранных на территории Семипалатинского испытательного полигона.

Средний химический выход изотопов самария, согласно использованной схеме выделения, составил 83 %, предел обнаружения – 0,01 Бк/г.

Численные значения удельной активности ^{151}Sm , зафиксированные для ряда исследованных образцов, находятся ниже нормативного значения. При этом какой-либо корреляционной зависимости между содержанием в почве ^{137}Cs и ^{151}Sm установлено не было. Полагаем, что различный характер поверхностного распределения ^{137}Cs и ^{151}Sm может быть обусловлен различиями в процессах формирования радиоактивного загрязнения при ядерных испытаниях, а именно наличием у ^{137}Cs газообразных предшественников, повлиявших на его распространение при выпадении радиоактивных частиц.

Таблица 2. Удельная активность радионуклида ^{151}Sm в пробах почвы

Table 2. ^{151}Sm specific activity in soil samples

Точка отбора Sampling point	1	2	3	4	5	6	7	8	9	холостая проба blank sample
^{151}Sm , Бк/кг/ Вq/g	<п.о./ L_d	181±27	168±25	<п.о./ L_d	<п.о./ L_d	176±26	158±24	290±40	186±28	<п.о./ L_d

п.о. – предел обнаружения (<0,01 Бк/г)/ L_d – limit detection (<0,01 Вq/g).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Почвоведение. В 2 ч. / под ред. В.А. Ковды, Б.Г. Розанова. – М.: Высшая школа, 1988. – Ч. 1. – 402 с.
2. Паницкий А.В., Лукашенко С.Н., Магашева Р.Ю. Особенности вертикального распределения радионуклидов в почвах бывшего семипалатинского испытательного полигона // Фундаментальные исследования. – 2013. – № 10. – С. 2231–2236.
3. Analysis on the influence of forest soil characteristics on radioactive Cs infiltration and evaluation of residual radioactive Cs on surfaces / Y. Mori, M. Yoneda, Y. Shimada, S. Fukutani, M. Ikegami, R. Shimomura // Journal of Environmental Monitoring and Assessment. – 2018. – V. 190 – № 256. – P. 1–23. DOI: 10.1007/s10661-018-6571-0
4. Yoschenko V., Kashparov V., Ohkubo T. Radioactive contamination in forest by the accident of Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant: comparison with Chernobyl // Radiocesium Dynamics in a Japanese Forest Ecosystem / Eds. C. Takenaka, N. Hiji, N. Kaneko, T. Ohkubo. – Singapore: Springer, 2019. – P. 3–22. DOI: 10.1007/978-981-13-8606-0_1
5. Global ^{137}Cs fallout inventories of forest soil across Japan and their consequences half a century later / E. Ito, S. Miura, M. Aoyama, K. Shichi // Journal of Environmental Radioactivity. – 2020. – V. 225 – P. 106421–106421. DOI: 10.1016/J.JENVRAD.2020.106421
6. Vertical distribution of ^{137}Cs in forest soil after the ground fires / I. Davydova, M. Korbut, H. Kreitseva, A. Panasiuk, V. Melnyk // Ukrainian Journal of Ecology. – 2019. – V. 9. – № 3. – P. 231–240. DOI: 10.15421/2019_84
7. Василенко И.Я. Радиоактивный цезий // Природа. – 1999. – № 3. – С. 70–76
8. Plutonium, ^{137}Cs and uranium isotopes in Mongolian surface soils / K. Hirose, K. Kikawada, Y. Igarashi, H. Fujiwara, D. Jugder, Y. Matsumoto, T. Oi, M. Nomura // Journal of Environmental Radioactivity. – 2017. – V. 166. – P. 97–103.
9. Формы нахождения ^{137}Cs и ^{90}Sr в почвах Брянской области / С.К. Лисин, Г.П. Симирская, Ю.Н. Симирский, Ю.Ф. Родионов, В.М. Шубко // Радиация и риск. – 1993. – Вып. 3 – С. 129–133.
10. Determination of the ^{151}Sm half-life / M.-M. Bè, H. Isnard, P. Cassette, X. Mougeot, V. Lourenço, T. Altitzoglou, S. Pommé et al. // Radiochimica Acta. – 2015. – V. 103. – № 9. – P. 619–626. DOI: 10.1515/ract-2015-2393
11. Miranda M.G., Russell B., Ivanov P. Measurement of ^{151}Sm in nuclear decommissioning samples by ICP-MS/MS // Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. – 2018. – V. 316. – P. 831–838. DOI: 10.1007/s10967-018-5764-x
12. Analysis of environmental radionuclides. Handbook of radioactivity analysis / M. Jeřkovský, J. Kaizer, I. Kontůl, G. Lujanienė, M. Müllerová, P.P. Povinec. – Elsevier Ltd., 2019. – V. 2. – 1074 p. DOI: 10.1016/B978-0-12-814395-7.00003-9
13. Ojovan M.I., Lee W.E., Kalmykov S.N. An introduction to nuclear waste immobilisation (3rd ed.). – Elsevier Ltd, 2019. – 512 p. DOI: 10.1016/B978-0-08-102702-8.00011-X
14. Израэль Ю.А. Радиактивные выпадения после ядерных взрывов и аварий. – СПб: Прогресс-Погода, 1996. – 355 с.
15. Ядерные испытания СССР / В.Н. Михайлов, В.В. Адушкин, И.А. Андрушин, Н.П. Волошин, Ю.В. Дубасов, Р.И. Ильяев, В.Н. Михайлов, А.А. Спивак, А.К. Чернышев. – Саров, Изд-во РФЯЦ-ВНИИЭФ, 1997. – Т. 2. – 303 с.
16. Separation and purification and beta liquid scintillation analysis of ^{151}Sm in Savannah River Site and Hanford Site DOE high level waste / R.A. Dewberry, W.T. Boyce, N.E. Bibler, A.E. Ekechukwu, D.M. Ferrara // Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. – 2002. – V. 252. – № 3. – P. 503–513.
17. Validation of radiochemical methods for the determination of difficult-to-measure nuclides using LSC / N. Vajda, Z. Molnar, E. Bokori, S. Osváth, D. Párkányi, M. Braun // Abstract from International Conference on Advances in Liquid Scintillation Spectrometry. – Copenhagen, Denmark, 2017. – P. 50–51.
18. Мартыненко В.П., Никифоров М.В., Павлов А.А. Гамма-излучение продуктов мгновенного деления U^{235} , U^{238} , Pu^{239} . – Л.: Гидрометеиздат, 1971. – 247 с.
19. Справочник по геохимии / Г.В. Войткевич, А.В. Кокин, А.Е. Мирошников, В.Г. Прохоров. – М.: Недра, 1990. – 480 с.
20. Григорьев Н.А. О кларковом содержании химических элементов в верхней части континентальной коры // Литосфера. – 2002. – № 1. – С. 61–71.
21. Gunther E. What can we expect from the CIEMAT/NIST method? // Journal of Applied Radiation and Isotopes. – 2002. – V. 56. – P. 357–360.
22. Dobrin R.I., Pavelescu M., Dulama C.N. Measurements of beta ray emitters in LSC using efficiency tracing CIEMAT/NIST method // Romanian Journal of Physics. – 2011. – V. 56. – P. 1148–1155.
23. Altitzoglou T., Rožkov A. Standardisation of the ^{129}I , ^{151}Sm and $^{166\text{m}}\text{Ho}$ activity concentration using the CIEMAT/NIST efficiency tracing method // Journal of Applied Radiation and Isotopes. – 2016. – V. 109. – P. 281–285. DOI: 10.1016/j.apradiso.2015.12.048

Поступила 15.04.2022 г.

Информация об авторах

Сальменбаев С.Е., начальник группы лаборатории радиохимических исследований Института радиационной безопасности и экологии Национального ядерного центра Республики Казахстан; аспирант Алтайского государственного аграрного университета.

Берикхан К.А., техник лаборатории ядерно-физических методов анализа Института радиационной безопасности и экологии Национального ядерного центра Республики Казахстан.

Мухамедияров Н.Ж., ведущий инженер лаборатории элементного анализа Института радиационной безопасности и экологии Национального ядерного центра Республики Казахстан.

Жамалдинов Ф.Ф., начальник лаборатории ядерно-физических методов анализа Института радиационной безопасности и экологии Национального ядерного центра Республики Казахстан.

Харченко А.А., инженер лаборатории ядерно-физических методов анализа Института радиационной безопасности и экологии Национального ядерного центра Республики Казахстан

Мустафина К.Т., техник лаборатории ядерно-физических методов анализа Института радиационной безопасности и экологии Национального ядерного центра Республики Казахстан.

UDC 546.659:539.16: 504.06:504.53

DETERMINATION OF ^{151}Sm IN SOIL SAMPLES BY USING LIQUID SCINTILLATION COUNTING METHOD

Sayan E. Salmenbaev^{1,2},
salmenbayev@nnc.kz

Kaiyrzhan A. Berikhan¹,
berikhan_kaiyrzhan@nnc.kz

Nurlan Zh. Mukhamediyarov¹,
mukhamediyarov@nnc.kz

Fail F. Zhamaldinov¹,
zhamaldinov@nnc.kz

Artem A. Kharchenko¹,
kharchenko@nnc.kz

Kuralay T. Mustafina¹,
Kuralay@nnc.kz

¹ National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan,
2, Beibit Atom street, Kurchatov, 071100, Kazakhstan.

² Altai State Agrarian University,
98, Krasnoarmeyskiy avenue, Barnaul, 656049, Russia.

The relevance. One of the relatively long-lived nuclear fission products is ^{151}Sm ($T_{1/2} \sim 90$ years). The total cumulative yield of ^{151}Sm upon fission of the isotopes ^{235}U , ^{239}Pu and ^{238}U is 0,46, 1,29 and 0,83 %, respectively. The estimated amount of ^{151}Sm that could have been dispersed during ground and atmospheric tests at Semipalatinsk test site is $6,1 \cdot 10^5$ Ci. The current situation with the levels of radioactive contamination of the soil cover with this radionuclide is still unknown.

The aim of the research is to develop the method for radiochemical determination of ^{151}Sm in Semipalatinsk test site soils using liquid scintillation spectrometry.

Objects. Surface soil samples were taken from the territory of the former Semipalatinsk test site. The main sampling criteria were the presence of ^{137}Cs as a possible indicator of the presence of ^{151}Sm and the absence of radioactive isotopes of Eu as the main interfering radionuclide. The specific activity of ^{137}Cs in the samples under study varied from 3,6 to 780 Bq/kg.

Methods. The proposed method for ^{151}Sm determination includes complete dissolution of the samples with concentrated acids (HF and HNO_3 and their mixtures), isolation and radiochemical purification with ion exchange resins, as well as precipitation of poorly soluble substances. In order to determine the chemical yield, 0,5 mg of Sm-carrier was added to each sample as an indicator. The quenching curve for ^{151}Sm was prepared using the CIEMAT/NIST approach. The ^{151}Sm specific activity was measured using Quantulus 1220 LSC.

Results. The radiochemical purification of the ^{151}Sm fraction from interfering beta emitters was analyzed and evaluated, as well as the effect of natural samarium on the chemical yield. The contribution of natural samarium regarding to the clarke does not exceed 8 % (for 5 g soil sample), and in relation to the experimentally measured amount – 0,5 %. However, it seems more expedient to double the amount of the added carrier (up to 1 mg per sample), which will reduce the contribution of natural samarium to 4 % (relative to the clarke). Gamma-spectrometric measurements of the isolated samarium fraction indicate the possibility of its contamination with some residual amount of strontium isotopes (^{85}Sr was used as an indicator), the maximum amount of which, obviously, does not exceed 5 %. The specific activity of all other considered radionuclides is below the detection limits. MDA value obtained for ^{151}Sm in this work was in the region of 0,01 Bq/g. The mean chemical recovery of ^{151}Sm was 83 %. The specific activity of ^{151}Sm in surface soil ranged from 158 to 290 Bq/kg.

Key words:

Isotopes, radioactive elements, soil, radioactive contamination, Semipalatinsk test site, ^{151}Sm , radiochemical determination, liquid scintillation counting.

REFERENCES

- Kovda V.A., Rozanova B.G. *Pochvovedenie* [Soil science]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1988. Vol. 1, 402 p.
- Panitskiy A.V., Lukashenko S.N., Magasheva R.Yu. *Osobennosti vertikalnogo raspredeleniya radionuklidov v pochvakh byvshego semipalatinskogo ispytatelnogo poligona* [The features of the vertical distribution of radionuclides in the soils of the former Semipalatinsk test site]. *Fundamental research*, 2013, no. 10, pp. 2231–2236.
- Mori Y., Yoneda M., Shimada Y., Fukutani S., Ikegami M., Shimomura R. Analysis on the influence of forest soil characteristics on radioactive Cs infiltration and evaluation of residual radioactive Cs on surfaces. *Journal of Environmental Monitoring and Assessment*, 2018, vol. 190, no. 256, pp. 1–23. DOI: 10.1007/s10661-018-6571-0
- Yoschenko V., Kashparov V., Ohkubo T. Radioactive contamination in forest by the accident of Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant: comparison with Chernobyl. *Radiocesium Dynamics in a Japanese Forest Ecosystem*. Eds. C. Takenaka, N. Hiji, N. Kaneko, T. Ohkubo. Singapore, Springer, 2019. pp. 3–22. DOI: 10.1007/978-981-13-8606-0_1
- Ito E., Miura S., Aoyama M., Shichi K. Global ^{137}Cs fallout inventories of forest soil across Japan and their consequences half a century later. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2020, vol. 225, pp. 106421–106421. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2020.106421
- Davydova I., Korbut M., Kreitseva H., Panasiuk A., Melnyk V. Vertical distribution of ^{137}Cs in forest soil after the ground fires. *Ukrainian Journal of Ecology*, 2019, vol. 9, no. 3, pp. 231–240. DOI: 10.15421/2019_84
- Vasilenko I.Ya. Radioaktivny tseziy [Radioactive cesium]. *Priroda*, 1999, no. 3, pp. 70–76.
- Hirose K., Kikawada K., Igarashi Y., Fujiwara H., Jugder D., Matsumoto Y., Oi T., Nomura M. Plutonium, ^{137}Cs and uranium isotopes in Mongolian surface soils. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2017, vol. 166, pp. 97–103.
- Lisin S.K., Simirskaya G.P., Simirskiy Yu.N., Rodionov Yu.F., Shubko V.M. *Formy nakhozhdeniya ^{137}Cs i ^{90}Sr v pochvakh Bryanskoy oblasti* [Forms of occurrence of ^{137}Cs in soils of the Bryansk region]. *Radiatsiya i risk*, 1993, vol. 3, pp. 129–133.
- Bé M.-M., Isnard H., Cassette P., Mougeot X., Lourenço V., Altitzoglou T., Pommé S. Determination of the ^{151}Sm half-life. *Radiochimica Acta*, 2015, vol. 103, no. 9, pp. 619–626. DOI: 10.1515/ract-2015-2393

11. Miranda M.G., Russell B., Ivanov P. Measurement of ^{151}Sm in nuclear decommissioning samples by ICP-MS/MS. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2018, vol. 316, pp. 831–838. DOI: 10.1007/s10967-018-5764-x
12. Jeřkovský M., Kaizer J., Kontuľ I., Lujanienė G., Müllerová M., Povinec P.P. *Analysis of environmental radionuclides. Handbook of Radioactivity Analysis*. Elsevier Ltd., 2019. Vol. 2, 1074 p. DOI: 10.1016/B978-0-12-814395-7.00003-9
13. Ojovan M.I., Lee W.E., Kalmykov S.N. *An introduction to nuclear waste immobilisation* (3rd ed.). Elsevier Ltd, 2019. 512 p. DOI: 10.1016/B978-0-08-102702-8.00011-X
14. Izrael Yu.A. *Radiaktivnye vypadeniya posle yadernykh vzryvov i avarií* [Radioactive fallout after nuclear explosions and accidents]. St. Peterburg, Progress-Pogoda Publ., 1996. 355 p.
15. Mikhaylov V.N., Adushkin V.V., Andryushin I.A., Voloshin N.P., Dubasov Yu.V., Ilkaev R.I., Mikhaylov V.N., Spivak A.A., Chernyshev A.K. *Yadernye ispytaniya SSSR* [Nuclear tests conducted in the USSR]. Sarov, RFYAC-VNIIEF Publ., 1997. No. 2, 303 p.
16. Dewberry R.A., Boyce W.T., Bibler N.E., Ekechukwu A.E., Ferrara D.M. Separation and purification and beta liquid scintillation analysis of ^{151}Sm in Savannah River Site and Hanford Site DOE high level waste. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2002, vol. 252, no. 3, pp. 503–513.
17. Vajda N., Molnar Z., Bokori E., Osváth S., Párkányi D., Braun M. Validation of radiochemical methods for the determination of difficult-to-measure nuclides using LSC. *Abstract from International Conference on Advances in Liquid scintillation Spectrometry*. Copenhagen, Denmark, 2017. pp. 50–51.
18. Martynenko V.P., Nikiforov M.V., Pavlov A.A. *Gamma-izluchenie produktov mgnovennogo deleniya U^{235} , U^{238} , Pu^{239}* [Gamma radiation from instant fission products of U^{235} , U^{238} , Pu^{239}]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1971. 247 p.
19. Voytkovich G.V., Kokin A.V., Miroshnikov A.E., Prokhorov V.G. *Spravochnik po geokhīmii* [Handbook of Geochemistry]. Moscow, Nedra Publ., 1990. 480 p.
20. Grigorev N.A. O klarkovom sodержanii khimicheskikh elementov v verkhney chasti kontinentalnoy kory [Clarke content of chemical elements in the upper part of the continental crust]. *Litosfera*, 2002, no. 1, pp. 61–71.
21. Gunther E. What can we expect from the CIEMAT/NIST method? *Journal of Applied Radiation and Isotopes*, 2002, vol. 56, pp. 357–360.
22. Dobrin R.I., Pavelescu M., Dulama C.N. Measurements of beta ray emitters in LSC using efficiency tracing CIEMAT/NIST method. *Romanian Journal of Physics*, 2011, vol. 56, pp. 1148–1155.
23. Altitzoglou T., Rožkov A. Standardisation of the ^{129}I , ^{151}Sm and ^{166m}Ho activity concentration using the CIEMAT/NIST efficiency tracing method. *Journal of Applied Radiation and Isotopes*, 2016, vol. 109, pp. 281–285. DOI: 10.1016/j.apradiso.2015.12.048

Received: 15 April 2022.

Information about the authors

Sayan E. Salmenbaev, team leader, National Nuclear Center of Kazakhstan; the postgraduate, Altai State Agrarian University.

Kayirjan A. Berikkhan, technician, National Nuclear Center of Kazakhstan.

Nurlan Zh. Mukhamediyarov, lead engineer, National Nuclear Center of Kazakhstan.

Fail. F. Zhamaldinov, head of the laboratory, National Nuclear Center of Kazakhstan.

Artem A. Kharchenko, engineer, National Nuclear Center of Kazakhstan.

Kuralay T. Mustafina, technician, National Nuclear Center of Kazakhstan.

УДК 536.2.01

РАСЧЁТ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ В ПЛАСТЕ НА СТАДИИ ИНИЦИАЦИИ ПРОЦЕССА ПАРОГРАВИТАЦИОННОГО ДРЕНАЖА

Гильманов Александр Янович¹,
a.y.gilmanov@utmn.ru

Шевелёв Александр Павлович¹,
alexandershevelev@mail.ru

¹ Тюменский государственный университет,
Россия, 625003, г. Тюмень, ул. Перекопская, 15а.

Актуальность. Статья посвящена расчёту распределения температуры в пласте при использовании парогравитационного дренажа и определению времени прогрева межскважинной зоны с помощью численного решения дифференциального уравнения теплопроводности при многомерной постановке задачи. В связи со значительной долей высоковязкой нефти среди мировых запасов углеводородов актуальным становится применение для добычи такой нефти методов увеличения нефтеотдачи, в том числе метода парогравитационного дренажа. Существующие модели для оценки температуры на стадии инициации процесса не учитывают протяжённости горизонтальной скважины, распределения температуры в нагнетательной скважине или влияния нагнетательных скважин от соседних элементов разработки. Предлагаемая математическая модель впервые учитывает интерференцию скважин.

Целью работы является определение времени прогрева межскважинной области с учётом интерференции нагнетательных скважин с помощью численного решения многомерного уравнения теплопроводности.

Методы. Рассматриваются двумерная и трёхмерная задачи теплопроводности, температура в стволе нагнетательной скважины считается меняющейся по линейному закону из-за тепловых потерь, учитывается влияние на температуру в добывающей скважине не только ближайшей нагнетательной скважины, но и четырёх соседних нагнетательных скважин.

Результаты. Рассчитана динамика температуры в одной из добывающих скважин с учётом влияния не только ближайших нагнетательных скважин, но и нескольких нагнетательных скважин из соседних элементов разработки. Показано, что динамика температуры в добывающей скважине для двумерной и трёхмерной постановок задачи соответствуют друг другу, поэтому распределение температуры в пласте не зависит от угловой координаты. Определено время прогрева зоны между нагнетательной и добывающей скважинами, когда нефть становится достаточной подвижной, чтобы обеспечить приток к добывающей скважине. Проведена верификация модели путём сопоставления распределения температуры в пласте с данными по модели Ли и Чена.

Ключевые слова:

Распределение температуры, парогравитационный дренаж, теплофизика, численные методы, явная конечно-разностная схема, трёхмерная задача.

Введение

В настоящее время активно вовлекаются в разработку запасы высоковязкой нефти. Основной способ добычи такой нефти – применение тепловых методов увеличения нефтеотдачи. Среди этих методов самым эффективным является метод парогравитационного дренажа (Steam-assisted gravity drainage (SAGD)) [1–4], предложенный Р. Батлером в 1970-е гг. [5]. Эта технология подразумевает бурение двух горизонтальных скважин на небольшом удалении друг от друга, причём скважины располагаются вблизи нижней границы (подшвы) пласта [6] (рис. 1). Верхняя скважина используется для нагнетания пара [7], нижняя предназначена для добычи нефти [8]. Применение метода SAGD невозможно без устойчивой тепловой и гидродинамической связи между нагнетательной и добывающей скважинами. Прогрев межскважинного пространства осуществляется за счёт циркуляции пара в обеих скважинах без проникновения пара в пласт [9]. Длительность первой стадии существенным образом зависит от температуры в добывающей скважине [10–14]. Без оценки продолжительности этой стадии экономическая эффективность технологии может быть существенно ниже.

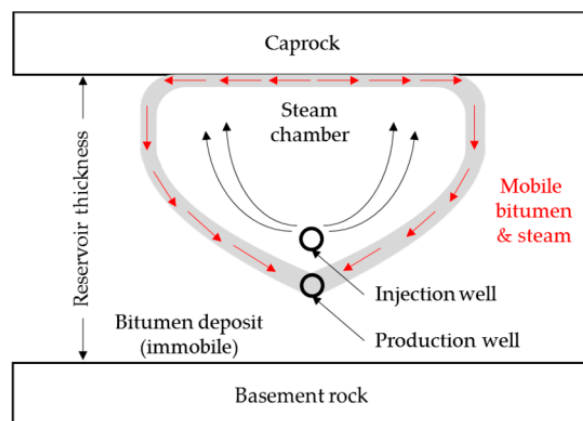


Рис. 1. Технология парогравитационного дренажа (caprock – кровля пласта, basement rock – подошва пласта, steam chamber – паровая камера, reservoir thickness – мощность пласта, bitumen deposit (immobile) – запасы высоковязкой нефти (не подвижные), mobile bitumen & steam – подвижная нефть и пар, injection well – нагнетательная скважина, production well – добывающая скважина)

Fig. 1. Steam-assisted gravity drainage technology

В протяжённых пластах количество элементов разработки, каждый из которых состоит из пары скважин (нагнетательной и добывающей), значительно. Поэтому на распределение температуры в добывающей скважине могут оказывать влияние нагнетательные скважины от близлежащих элементов разработки. Использование датчиков температуры в добывающей скважине [15] не позволяет определить вклад каждой нагнетательной скважины в итоговое распределение температуры в добывающей скважине.

Распространённым подходом для решения такой задачи является использование гидродинамических симуляторов [16]. Однако в случае расчётов с их использованием формируемый тепловой канал имеет колоколообразную форму [17], что не подтверждается экспериментами К. Чанга и Р. Батлера [18].

Для задачи интерференции скважин фундаментальные решения уравнения теплопроводности [19, 20] напрямую не применимы. Расчёты тепловой задачи в такой постановке, проведённые М. Ирани [21], не учитывают протяжённость горизонтальной скважины, что может существенным образом повлиять на картину теплового поля.

В радиальной постановке с постоянной температурой в протяжённом источнике задача аналитического решения не имеет, а рассмотренные модели не решают указанных проблем. Поэтому актуальной остаётся задача получения численного решения интерференции тепловых полей от нескольких протяжённых источников. Задача осложняется в случае неоднородного распределения температуры по добывающей скважине [22].

Целью работы является определение времени прогрева межскважинной области с учётом интерференции нагнетательных скважин с помощью численного решения многомерного уравнения теплопроводности. Впервые предлагается теплофизическая модель, учитывающая протяжённость горизонтальной скважины, распределение температуры вдоль её ствола, влияние нагнетательных скважин от соседних элементов разработки на распределение температуры в добывающей скважине, что требует изменения граничных условий в сравнении с существующими моделями [21, 23].

Постановка задачи

Рассматривается бесконечный пласт мощностью h , в котором пробурена система пар нагнетательных и добывающих скважин длиной L каждая (рис. 2). Каждая добывающая скважина пробурена под соответствующей нагнетательной скважиной параллельно ей. Расстояние между нагнетательной и ближайшей добывающей скважинами равно d , расстояние между парами скважин c . Вводится цилиндрическая система координат с началом в «носке» нагнетательной скважины, ось z направлена вдоль ствола этой скважины, r – радиальная ось, φ – полярный угол. Температура пара в стволе нагнетательной скважины меняется от T_{s1} в точке $z=0$ до T_{s2} в точке $z=L$ по линейному закону. Это изменение вызвано тепловыми потерями при движении пара по горизонтальному участку скважины. В непрогретой области температура пласта всюду одинакова и равна T_0 . Радиус скважины гораздо меньше расстояний d , c , h , поэтому распределением температуры по сечению скважин можно пренебречь.

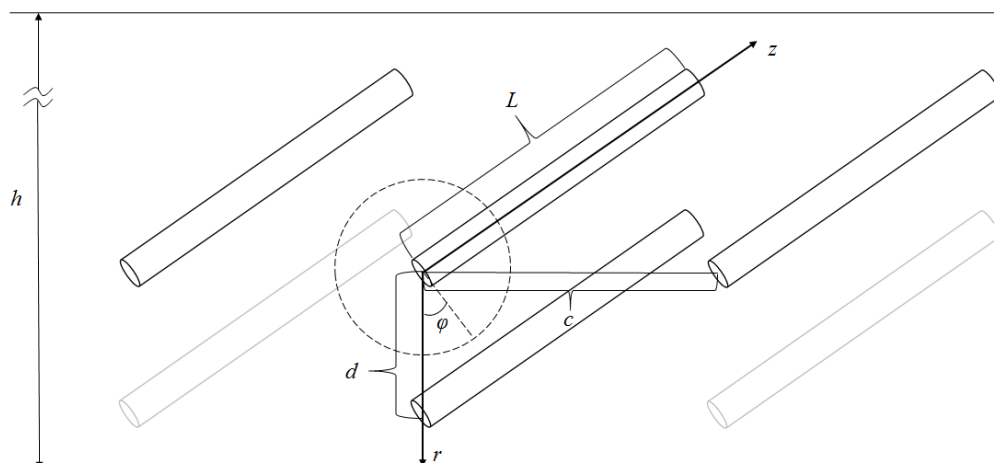


Рис. 2. Технологическая схема расположения скважин (h – мощность пласта, d – расстояние между верхней и нижней скважинами, c – расстояние между ближайшими нагнетательными скважинами, L – длина горизонтальной скважины, r – радиальная координата, φ – полярный угол, z – координата вдоль ствола горизонтальной скважины)

Fig. 2. Technological scheme of well locations (h – reservoir thickness, d – distance between injector and producer, c – distance between the nearest injectors, L – length of the horizontal well, r – radial coordinate, φ – polar angle, z – coordinate along the horizontal wellbore)

Горизонтальные скважины в верхнем ряду являются нагнетательными, в нижнем – добывающими. Расстояние между нагнетательной скважиной и ближайшей добывающей d много меньше мощности пласта h и расстояния между соседними парами скважин

c и составляет, как правило, 5–10 м. В такой постановке задача является трёхмерной задачей теплопроводности. Однако в силу радиально-симметричного распространения теплового поля можно рассматривать двумерную задачу с координатами z и r .

Учитываются 5 элементов разработки, поскольку остальные элементы разработки находятся на значительном удалении от рассматриваемого участка пласта. Добывающая скважина, находящаяся в центре такого участка пласта по горизонтальной координате, в дальнейшем называется рассматриваемой.

Математическая модель

Процессы распространения тепла в пласте описываются уравнением теплопроводности [19]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \Delta T, \quad (1)$$

где t – время, a – коэффициент температуропроводности пласта.

В цилиндрической системе координат уравнение (1) приобретает вид:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right). \quad (2)$$

В двумерной постановке задачи уравнение теплопроводности (2) выглядит следующим образом:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right). \quad (3)$$

Для решения задачи необходимо задать начальные и граничные условия. Начальные условия имеют вид:

$$\begin{aligned} r = 0, \forall \varphi, z, t = 0, \quad r = c, \varphi = \frac{\pi}{2}, z, t = 0, \\ r = c, \varphi = \frac{3\pi}{2}, z, t = 0, \quad r = 2c, \varphi = \frac{\pi}{2}, z, t = 0, \\ r = 2c, \varphi = \frac{3\pi}{2}, z, t = 0: T = \frac{(T_{s2} - T_{s1})z}{L} + T_{s1}, \quad (4) \\ 0 < r < c, \forall \varphi, \forall z, t = 0, \\ r = c, \varphi \neq \frac{\pi}{2}, \varphi \neq \frac{3\pi}{2}, \forall z, t = 0, \\ 0 < r < 2c, \forall \varphi, \forall z, t = 0, \\ r = 2c, \varphi \neq \frac{\pi}{2}, \varphi \neq \frac{3\pi}{2}, \forall z, t = 0: T = T_0. \quad (5) \end{aligned}$$

Условия (4) соответствуют нагнетательным скважинам с линейным распределением температуры вдоль горизонтального участка скважин. Условия (5) характеризуют температуру невозмущённого пласта.

Задача решалась при следующих граничных условиях:

$$\begin{aligned} r = 0, \forall \varphi, z, t > 0, \quad r = c, \varphi = \frac{\pi}{2}, z, t > 0, \\ r = c, \varphi = \frac{3\pi}{2}, z, t > 0, \quad r = 2c, \varphi = \frac{\pi}{2}, z, t > 0, \\ r = 2c, \varphi = \frac{3\pi}{2}, z, t > 0: T = \frac{(T_{s2} - T_{s1})z}{L} + T_{s1}, \quad (6) \\ r = h, \forall \varphi, \forall z, t > 0: T = T_0, \quad (7) \\ 0 < r < c, \forall \varphi, z = 0, t > 0, \end{aligned}$$

$$r = c, \varphi \neq \frac{\pi}{2}, \varphi \neq \frac{3\pi}{2}, z = 0, t > 0,$$

$$0 < r < 2c, \forall \varphi, z = 0, t > 0,$$

$$r = 2c, \varphi \neq \frac{\pi}{2}, \varphi \neq \frac{3\pi}{2}, z = 0, t > 0,$$

$$0 < r < c, \forall \varphi, z = L, t > 0,$$

$$r = c, \varphi \neq \frac{\pi}{2}, \varphi \neq \frac{3\pi}{2}, z = L, t > 0,$$

$$0 < r < 2c, \forall \varphi, z = L, t > 0,$$

$$r = 2c, \varphi \neq \frac{\pi}{2}, \varphi \neq \frac{3\pi}{2}, z = L, t > 0: \frac{\partial T}{\partial z} = -\frac{q_T}{\lambda}, \quad (8)$$

$$0 < r < c, \varphi = 0, 0 < z < L, t > 0,$$

$$c < r < 2c, \varphi = 0, 0 < z < L, t > 0,$$

$$0 < r < c, \varphi = 2\pi, 0 < z < L, t > 0,$$

$$c < r < 2c, \varphi = 2\pi, 0 < z < L, t > 0: \frac{\partial T}{\partial \varphi} = -\frac{q_T r}{\lambda}, \quad (9)$$

где q_T – удельный (на единицу площади) тепловой поток.

Условия (6) соответствуют линейному распределению температуры вдоль ствола нагнетательной скважины, условие (7) характеризует сохранение пластовой температуры на удалении от скважины, условия (8), (9) соответствуют тепловым потокам на границах из-за постоянного подвода тепла в пласт и нагрева элемента разработки не только от одной рассматриваемой нагнетательной скважины, но и от соседних нагнетательных скважин.

В двумерной постановке задачи начальные условия (4), (5) приобретают вид:

$$r = 0, z = 0, \quad r = c, z = 0, \quad r = 2c, z = 0:$$

$$T = \frac{(T_{s2} - T_{s1})z}{L} + T_{s1}, \quad (10)$$

$$0 < r < c, \forall z, 0, \quad 0 < r < 2c, \forall z, 0: T = T_0. \quad (11)$$

Граничные условия (6)–(9) в этом случае становятся следующими:

$$r = 0, z, t > 0, \quad r = c, z, t > 0, \quad r = 2c, z, t > 0,$$

$$r = 2c, z, t > 0: T = \frac{(T_{s2} - T_{s1})z}{L} + T_{s1}, \quad (12)$$

$$r = h, \forall z, t > 0: T = T_0, \quad (13)$$

$$0 < r < c, z = 0, t > 0, \quad 0 < r < 2c, z = 0, t > 0,$$

$$0 < r < c, z = L, t > 0, \quad 0 < r < 2c, z = L, t > 0,$$

$$\frac{\partial T}{\partial z} = -\frac{q_T}{\lambda}, \quad (14)$$

имеющими прежний физический смысл.

Дифференциальное уравнение теплопроводности (2) для трёхмерной постановки задачи и (3) для двумерной решается численно с помощью явной конечно-разностной схемы для определения распределения температуры в пласте.

Распределение температуры в пласте

Для расчёта распределения температуры в пласте с помощью предлагаемой математической модели были использованы следующие данные: начальная пластовая температура $T_0=300$ К, минимальная температура пара в стволе горизонтальной скважины $T_{s1}=420$ К, максимальная температура пара в стволе скважины $T_{s2}=450$ К, длина горизонтальной скважины $L=300$ м, расстояние между нагнетательной и ближайшей добывающей скважинами $d=5$ м, мощность пласта $h=30$ м, расстояние между соседними парами скважин $c=100$ м, коэффициент температуропроводности пласта $a=10^{-6}$ м²/с [24], плотность породы $\rho_r=2500$ кг/м³, удельная теплоёмкость породы $c_r=500$ Дж/(кг·К) [25]. Коэффициент теплопроводности связан с коэффициентом температуропроводности по следующей формуле:

$$\lambda = a\rho_r c_r. \quad (15)$$

Для расчётов выбран шаг по координате вдоль ствола горизонтальной скважины $\Delta z=d/100=3$ м, чтобы разбить расчётную область на 100 малых отрезков в соответствующем направлении, аналогично выбран шаг по радиальной координате $\Delta r=h/100=0,3$ м, взят шаг по угловой координате $\Delta \varphi=\pi/360$ рад=0,00872 рад, чтобы он был достаточно малым и равнялся 0,5°. Шаг по времени $\Delta t=36$ с подобран эмпирически как максимально возможный, при котором используемая явная схема даёт устойчивое решение без больших вычислительных погрешностей, но который позволяет сэкономить расчётное время. Коэффициент теплопроводности рассчитывался из формулы (15).

В результате расчётов с использованием двумерного уравнения теплопроводности с учётом начальных условий (10), (11) и граничных условий (12)–(14) для рассматриваемой добывающей скважины получена зависимость температуры от времени прогрева, показанная на рис. 3.

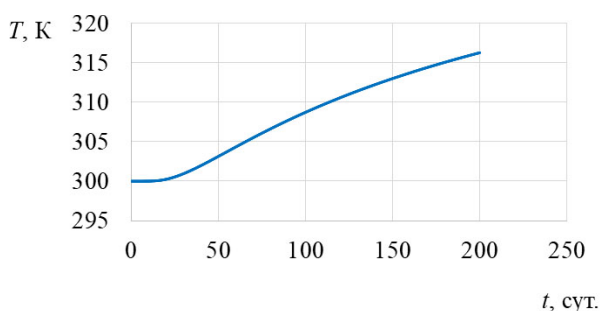


Рис. 3. Зависимость температуры в добывающей скважине от времени прогрева (T – температура в добывающей скважине, t – время прогрева)

Fig. 3. Dynamics of the temperature in the producer (T – temperature in the producer, t – heating time)

Анализ результатов расчётов показывает, что с течением времени температура в добывающей скважине увеличивается, формируется тепловая связь между нагнетательной и добывающей скважинами. С возрастанием температуры снижается вязкость тяжёлой нефти [26], она становится более подвижной. Ес-

ли считать, что при некоторой критической температуре, равной 315 К [26], нефть становится достаточно подвижной, чтобы обеспечивать приток к добывающей скважине, то можно определить необходимое время прогрева межскважинной зоны. С учётом расчётных данных оно составляет 185 сут.

Сопоставление расчётных динамик температуры в добывающей скважине для двумерной и трёхмерной задач показывает соответствие зависимостей температуры от времени для указанных задач между собой с высокой точностью (рис. 4). Это подтверждает, что в данном случае распределение температуры в пласте не зависит от угловой координаты, поэтому в дальнейшем можно рассматривать двумерную задачу, выводы которой будут справедливы и при использовании трёхмерной системы координат.

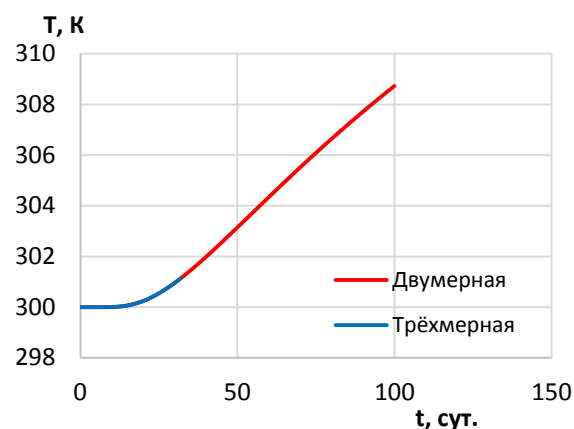


Рис. 4. Сопоставление динамик температуры в добывающей скважине для двумерной и трёхмерной задач (T – температура в добывающей скважине, t – время прогрева)

Fig. 4. Comparison of temperature dynamics in a production well for two-dimensional and three-dimensional problems (T – temperature in the producer, t – heating time)

Распределение температуры в пласте по радиальной координате для координат $z=0$ м («носка» горизонтальной скважины), $z=150$ м (середины горизонтальной скважины), $z=300$ м («пятки» горизонтальной скважины) спустя 100 сут. после начала закачки пара имеет вид, показанный на рис. 5. Анализ результатов показывает, что температура в пласте быстро убывает при увеличении радиальной координаты от значения температуры закачиваемого пара до значения начальной пластовой температуры, что обусловлено невысокими значениями коэффициента температуропроводности пласта. Поэтому прогрев межскважинной зоны, несмотря на небольшое удаление добывающей скважины от ближайшей нагнетательной, происходит в течение длительного промежутка времени – 185 сут. Однако в сравнении с традиционным методом закачки пара в пласт, где нагнетательная скважина удалена от добывающей на расстояние порядка размеров пласта (100 м и более), установление тепловой связи между нагнетательной и добывающей скважинами при парогравитационном дренаже происходит быст-

рее. В этом заключается одно из преимуществ метода парогравитационного дренажа.

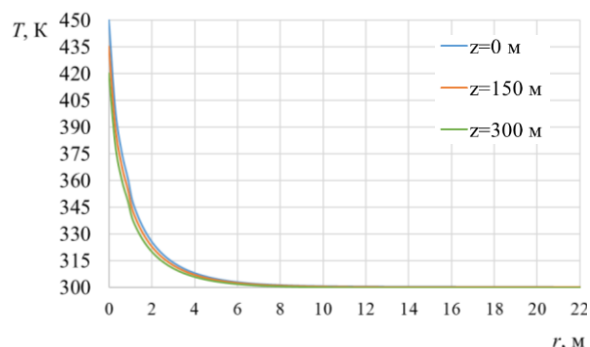


Рис. 5. Распределение температуры в пласте для различных горизонтальных координат (T – температура в пласте, z – горизонтальная координата, направленная вдоль ствола скважины, r – радиальная координата)

Fig. 5. Temperature distribution in the reservoir for different horizontal coordinates (T – temperature in the reservoir, z – horizontal coordinate directed along the borehole, r – radial coordinate)

Для подтверждения достоверности результатов моделирования проведено сопоставление распределения температуры в пласте на расстоянии r от нагнетательной скважины с данными, полученными по модели Ли и Чена [25], в которой отсутствует учёт распределения температуры в горизонтальной скважине, её протяжённости и влияния соседних нагнетательных скважин на температуру в добывающей. В соответствии с работой [25] для моделирования взяты следующие данные по месторождению Дувер [25, 27]: начальная пластовая температура $T_0=293$ К, длина горизонтальной скважины $L=500$ м, расстояние между нагнетательной и ближайшей добывающей скважинами $d=5$ м, мощность пласта $h=24$ м, расстояние между соседними парами скважин $c=70$ м, коэффициент температуропроводности пласта $a=7 \cdot 10^{-7}$ м²/с, плотность породы $\rho_r=2500$ кг/м³, удельная теплоёмкость породы $c_r=500$ Дж/(кг·К), время окончания моделирования 850 сут. Поскольку в модели Ли и Чена [25] температура пара в скважине полагалась постоянной, то в предлагаемой в настоящей статье модели для верификации принято, что $T_{s1}=T_{s2}=478$ К, $z=0$. Сопоставление рассчитанного распределения температуры в пласте на расстоянии r от нагнетательной скважины с данными, полученными Ли и Ченом [25], в момент времени 850 сут. после начала процесса па-

рогравитационного дренажа приведено на рис. 6. Указанное сопоставление свидетельствует о верификации модели, поскольку расчётное распределение температуры соответствует распределению температуры, полученному Ли и Ченом [25], с точностью 5 %.

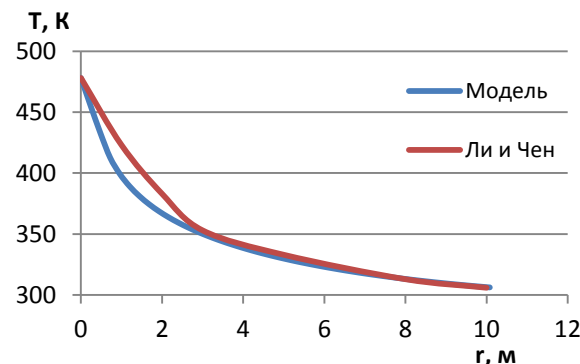


Рис. 6. Сопоставление рассчитанного распределения температуры с данными Ли и Чена [25] (T – температура в пласте, r – радиальная координата)

Fig. 6. Comparison of the calculated temperature distribution with the data obtained by Li and Chen [25] (T – temperature in the reservoir, r – radial coordinate)

Выводы

1. Разработанная математическая модель для расчёта распределения температуры в пласте при двумерной и трёхмерной постановке задачи впервые учитывает влияние нескольких нагнетательных скважин на одну добывающую.
2. Распределение температуры в пласте не зависит от угловой координаты, поэтому можно рассматривать задачу в двумерной постановке.
3. С помощью предложенной математической модели рассчитано время прогрева межскважинного расстояния, составляющее 185 сут. для выбранных данных.
4. Верификация модели путём сопоставления с данными по модели Ли и Чена свидетельствует об удовлетворительном соответствии рассчитанного по их модели распределения температуры в пласте с результатами моделирования по предлагаемой в настоящей статье модели.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-45-720002.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. An experimental study of steam-assisted gravity drainage / K. Sheng, R. Okuno, M. Imran, T. Yamada // SPE Journal. – 2021. – V. 26. – P. 1515–1534.
2. Van Dorp J.J. Condensing solvent processes: in search of the production function // SPE Reservoir Evaluation & Engineering. – 2021. – V. 24. – P. 409–428.
3. Huang J., Babadagli T. Mechanics of SAGD efficiency improvement using combination of chemicals: an experimental analysis through 2D visual models // SPE Reservoir Evaluation & Engineering. – 2021. – V. 24. – P. 80–97.
4. Babadagli T. Technology focus: heavy oil (April 2021) // Journal of Petroleum Technology. – 2021. – V. 73. – № 4. – P. 48.
5. Батлер Р.М. Горизонтальные скважины для добычи нефти, газа и битумов / Пер. с англ. А.А. Козина. – М.: Ижевск: Институт компьютерных исследований, НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2010. – 544 с.
6. SAGD liner evaluation and liner test design for JACOS Hangingstone SAGD development / E.M. Spronk, L.T. Doan, Y. Matsuno, B. Harschnitz // Conference paper SPE-174503-MS. SPE Canada Heavy Oil Technical Conference. – Calgary, Alberta, Canada, 9–11 June 2015. – Calgary: Society of Petroleum Engineers, 2015. – P. 1–11.

7. Hinke S., Hooff G. Limited access ranging solution – mitigation of significant anti-collision issues // Conference paper SPE-199001-MS. SPE Latin American and Caribbean Petroleum Engineering Conference. – Bogota, 27–31 July 2020. – Bogota: Society of Petroleum Engineers, 2020. – P. 1–15.
8. Шандрыгин А.Н., Нухаев М.Т., Тертычный В.В. Разработка залежей тяжёлой нефти и природного битума методом парогравитационного дренажа (SAGD) // Нефтяное хозяйство. – 2006. – № 7. – С. 92–96.
9. Гильманов А.Я., Фёдоров К.М., Шевелёв А.П. Анализ тепловых полей на первичной стадии процесса парогравитационного дренажа // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. – 2021. – Т. 7. – № 2 (26). – С. 27–42.
10. Microscopic visualization with high resolution optical-fiber scope at steam chamber interface on initial stage of SAGD process / K. Sasaki, S. Akibayashi, N. Yazawa, F. Kaneko // Conference paper SPE-75241-MS. SPE/DOE Improved Oil Recovery Symposium. – Tulsa, 13–17 April 2002. – Tulsa: Society of Petroleum Engineers, 2002. – P. 1–8.
11. Batias J., Ortiz J., Nespork K. SAGD circulation strategy utilizing flow control devices // Conference paper SPE-198695-MS. SPE Thermal Well Integrity and Design Symposium. – Banff, 19–21 November 2019. – Banff: Society of Petroleum Engineers, 2019. – P. 1–14.
12. Hamdi Z., Foo F.K. Cold CO₂ and steam injection for heavy oil recovery // International Petroleum Technology Conference, Conference paper IPTC-20177-MS. – Dhahran, 13–15 January 2020. – Dhahran: International Petroleum Technology Conference, 2020. – P. 1–18.
13. Prasad S. Assessment of ESP no-flow events in SAGD production wells // Conference paper SPE-194420-MS. SPE Gulf Coast Section Electric Submersible Pumps Symposium. – The Woodlands, 13–17 May 2019. – The Woodlands: Society of Petroleum Engineers, 2019. – P. 1–23.
14. Moussa T., Patil S., Mahmoud M. Feasibility study of heavy oil recovery using in-situ steam generated by thermochemicals // Conference paper SPE-195358-MS. SPE Western Regional Meeting. – San Jose, 23–26 April 2019. – San Jose: Society of Petroleum Engineers, 2019. – P. 1–16.
15. SAGD production observations using fiber optic distributed acoustic and temperature sensing: «SAGD DAS – Listening to wells to improve understanding of inflow» / W. MacPhail, J. Kirkpatrick, B. Banack, B. Rapati, A.A. Asfour // Conference paper SPE-180726-MS. SPE Canada Heavy Oil Technical Conference. – Calgary, 7–9 June 2016. – Calgary: Society of Petroleum Engineers, 2016. – P. 1–20.
16. Wang C., Leung J.Y. Characterizing the effects of lean zones and shale distribution in steam-assisted-gravity-drainage recovery performance // SPE Reservoir Evaluation & Engineering. – 2015. – V. 18. – P. 329–345.
17. Nascimento C.M. Design, optimization and operation of SAGD wells using dynamic flow simulations // Conference paper SPE-180459-MS. SPE Western Regional Meeting. – San Jose, 23–26 May 2016. – San Jose: Society of Petroleum Engineers, 2016. – P. 1–25.
18. Chung K.H., Butler R.M. Geometrical effect of steam injection on the formation of emulsions in the steam-assisted gravity drainage process // Journal of Canadian Petroleum Technology. – 1988. – V. 27. – № 1. – P. 36–42.
19. Лыков А.В. Теплообмен. – М.: Энергия, 1978. – 480 с.
20. Исаченко В.И., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. Изд. 4-е, перераб. и доп. – М.: Энергоиздат, 1981. – 415 с.
21. Irani M. On subcool control in steam-assisted-gravity-drainage producers. P. I: Stability envelopes // SPE Journal. – 2018. – V. 23. – P. 841–867.
22. Исследование трёх моделей разработки неоднородных залежей сверхвязкой нефти при помощи технологии SAGD и мер по их совершенствованию / Ч. Си, Ч. Ян, С. Ду, Ю. Чжоу, Л. Ши, Л. Сань, С. Ли, Д. Ма // Статья с конференции SPE-196762-RU. Российская нефтегазовая техническая конференция SPE. – М., 22–24 октября 2019. – М.: Society of Petroleum Engineers, 2019. – С. 1–14.
23. Duong A.N., Tomberlin T.A., Cyrot M. A new analytical model for conduction heating during the SAGD circulation phase // Conference paper SPE/PS/CHOA 117434. International Thermal Operations and Heavy Oil Symposium. – Calgary, 20–23 October 2008. – Calgary: Society of Petroleum Engineers, 2008. – P. 1–9.
24. Чекалок Э.Б. Термодинамика нефтяного пласта. – М.: Недра, 1965. – 239 с.
25. Li Q., Chen Z. A new analysis on the convective heat transfer at the edge of the SAGD chamber // Conference paper SPE-175063-MS. SPE Annual Technical Conference and Exhibition. – Houston, 28–30 September 2015. – Houston: Society of Petroleum Engineers, 2015. – P. 1–21.
26. Гиматулинов Ш.К. Физика нефтяного и газового пласта. Изд. 2, перераб. и доп. – М.: Недра, 1971. – 312 с.
27. Yee C.-T., Stroich A. Flue gas injection into a mature SAGD steam chamber at the Dover project (formerly UTF) // Journal of Canadian Petroleum Technology. – 2004. – V. 43. – № 1. – P. 54–61.

Поступила 20.04.2022 г.

Информация об авторах

Гильманов А.Я., инженер 2 категории кафедры моделирования физических процессов и систем, Физико-технический институт Тюменского государственного университета.

Шевелёв А.П., кандидат физико-математических наук, доцент, профессор кафедры моделирования физических процессов и систем, Физико-технический институт Тюменского государственного университета.

UDC 536.2.01

CALCULATION OF TEMPERATURE DISTRIBUTION IN A RESERVOIR AT THE INITIATION STAGE OF STEAM-ASSISTED GRAVITY DRAINAGE

Aleksandr Ya. Gilmanov¹,
a.y.gilmanov@utmn.ru

Aleksandr P. Shevelev¹,
alexandershevelev@mail.ru

¹ University of Tyumen,
15a, Perekopskaya street, Tyumen, 625003, Russia.

The relevance. The article is devoted to the calculation of temperature distribution in a reservoir using steam-assisted gravity drainage and determination of the heating time of the inter-well zone using a numerical solution of the differential equation of thermal conductivity in a multidimensional formulation of the problem. The use of enhanced oil recovery methods, including the method of steam-assisted gravity drainage, becomes relevant for the production of high-viscosity oil, due to its significant share among the world's hydrocarbon reserves. The existing models for estimating the initiation stage of the process do not take into account the length of the horizontal well, the temperature distribution in the injection well, or the influence of injectors from neighboring development elements. The proposed mathematical model takes into account well interference.

The aim of the work is to determine the heating time of the inter-well area, considering the interference of injectors, using a numerical solution of the multidimensional heat equation.

Materials and methods. Two-dimensional and three-dimensional problems of thermal conductivity are considered, the temperature in the injection well is considered to vary linearly due to heat losses.

Results. The temperature dynamics in one of the producing wells is calculated taking into account the influence of not only the nearest injection wells, but also several injection wells from neighboring development elements. It is shown that the temperature dynamics in the producer for two-dimensional and three-dimensional formulations of the problem correspond to each other, so the temperature distribution in the reservoir does not depend on the angular coordinate. The heating time of the zone between the injector and producer is determined as the time, when oil becomes sufficiently mobile to provide an inflow to the producer.

Key words:

Temperature distribution, steam-assisted gravity drainage, thermophysics, numerical methods, explicit finite-difference scheme, three-dimensional problem.

The research was financially supported by the RFBR within the scientific project no. 20-45-720002.

REFERENCES

- Sheng K., Okuno R., Imran M., Yamada T. An experimental study of steam-assisted gravity drainage. *SPE Journal*, 2021, vol. 26, pp. 1515–1534.
- Van Dorp J.J. Condensing solvent processes: in search of the production function. *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*, 2021, vol. 24, pp. 409–428.
- Huang J., Babadagli T. Mechanics of SAGD efficiency improvement using combination of chemicals: an experimental analysis through 2D visual models. *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*, 2021, vol. 24, pp. 80–97.
- Babadagli T. Technology focus: heavy oil (April 2021). *Journal of Petroleum Technology*, 2021, vol. 73, no. 4, p. 48.
- Butler R.M. *Horizontal wells for the recovery of oil, gas and bitumen*. Calgary, The Petroleum Society of the Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum, 1994. 228 p.
- Spronk E.M., Doan L.T., Matsuno Y., Harschnitz B. SAGD liner evaluation and liner test design for JACOS Hangingstone SAGD development. *Conference paper SPE-174503-MS. SPE Canada Heavy Oil Technical Conference*. Calgary, Alberta, Canada, 9–11 June 2015. Calgary, Society of Petroleum Engineers, 2015. pp. 1–11.
- Hinke S., Hooff G. Limited access ranging solution – mitigation of significant anti-collision issues. *Conference paper SPE-199001-MS. SPE Latin American and Caribbean Petroleum Engineering Conference*. Bogota, 27–31 July 2020. Bogota, Society of Petroleum Engineers, 2020. pp. 1–15.
- Shandrygin A.N., Nukhaev M.T., Tertychniy V.V. Development of deposits of heavy crude and natural bitumen by a steam assisted gravity drainage. *Neftyanoe Khozyaystvo = Oil Industry*, 2006, no. 7, pp. 92–96. In Rus.
- Gilmanov A.Ya., Fedorov K.M., Shevelev A.P. The analysis of thermal fields at the primary stage of the steam-assisted gravity drainage process. *Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy*, 2021, vol. 7, no. 2 (26), pp. 27–42. In Rus.
- Sasaki K., Akibayashi S., Yazawa N., Kaneko F. Microscopic visualization with high resolution optical-fiber scope at steam chamber interface on initial stage of SAGD process. *Conference paper SPE-75241-MS. SPE/DOE Improved Oil Recovery Symposium*. Tulsa, 13–17 April 2002. Tulsa, Society of Petroleum Engineers, 2002. pp. 1–8.
- Batias J., Ortiz J., Nespor K. SAGD circulation strategy utilizing flow control devices. *Conference paper SPE-198695-MS. SPE Thermal Well Integrity and Design Symposium*. Banff, 19–21 November 2019. Banff, Society of Petroleum Engineers, 2019. pp. 1–14.
- Hamdi Z., Foo F.K. Cold CO₂ and steam injection for heavy oil recovery. *International Petroleum Technology Conference, Conference paper IPTC-20177-MS*. Dhahran, 13–15 January 2020. Dhahran, International Petroleum Technology Conference, 2020. pp. 1–18.
- Prasad S. Assessment of ESP no-flow events in SAGD production wells. *Conference paper SPE-194420-MS. SPE Gulf Coast Section Electric Submersible Pumps Symposium*. The Woodlands, 13–17 May 2019. The Woodlands, Society of Petroleum Engineers, 2019. pp. 1–23.
- Moussa T., Patil S., Mahmoud M. Feasibility study of heavy oil recovery using in-situ steam generated by thermochemicals. *Conference paper SPE-195358-MS. SPE Western Regional Meeting*. San Jose, 23–26 April 2019. San Jose, Society of Petroleum Engineers, 2019. pp. 1–16.
- MacPhail W., Kirkpatrick J., Banack B., Rapati B., Asfour A.A. SAGD production observations using fiber optic distributed acous-

- tic and temperature sensing: «SAGD DAS – Listening to wells to improve understanding of inflow». *Conference paper SPE-180726-MS. SPE Canada Heavy Oil Technical Conference*. Calgary, 7–9 June 2016. Calgary, Society of Petroleum Engineers, 2016. pp. 1–20.
16. Wang C., Leung J.Y. Characterizing the effects of lean zones and shale distribution in steam-assisted-gravity-drainage recovery performance. *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*, 2015, vol. 18, pp. 329–345.
 17. Nascimento C.M. Design, optimization and operation of SAGD wells using dynamic flow simulations. *Conference paper SPE-180459-MS. SPE Western Regional Meeting*. San Jose, 23–26 May 2016. San Jose, Society of Petroleum Engineers, 2016. pp. 1–25.
 18. Chung K.H., Butler R.M. Geometrical effect of steam injection on the formation of emulsions in the steam-assisted gravity drainage process. *Journal of Canadian Petroleum Technology*, 1988, vol. 27, no. 1, pp. 36–42.
 19. Lykov A.V. *Teplomassoobmen* [Heat and mass transfer]. Moscow, Energiya Publ., 1978. 480 p.
 20. Isachenko V.P., Osipova V.A., Sukomel A.S. *Teploperedacha* [Heat transfer]. 4th ed., revised and expanded. Moscow, Energoizdat Publ., 1981. 415 p.
 21. Irani M. On subcool control in steam-assisted-gravity-drainage producers – part I: stability envelopes. *SPE Journal*, 2018, vol. 23, pp. 841–867.
 22. Xi C., Yang Z., Du X., Zhou Y., Shi L., Sang L., Li X., Ma D. Three typical SAGD horizontal producer temperature modes and enhanced measures in heterogeneous super heavy oil reservoir – a case study in FC project of Xinjiang oilfield. *Conference paper SPE-196762-MS. SPE Russian Petroleum Technology Conference*. Moscow, Russia, 22–24 October 2019. Moscow, Society of Petroleum Engineers, 2019. pp. 1–12.
 23. Duong A.N., Tomberlin T.A., Cyrot M. A new analytical model for conduction heating during the SAGD circulation phase. *Conference paper SPE/PS/CHOA 117434. International Thermal Operations and Heavy Oil Symposium*. Calgary, 20–23 October 2008. Calgary, Society of Petroleum Engineers, 2008. pp. 1–9.
 24. Chekaliuk E.B. *Termodinamika neftyanogo plasta* [Thermodynamics of the oil reservoir]. Moscow, Nedra publ., 1965. 239 p.
 25. Li Q., Chen Z. A new analysis on the convective heat transfer at the edge of the SAGD chamber. *Conference paper SPE-175063-MS. SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. Houston, 28–30 September 2015. Houston, Society of Petroleum Engineers, 2015. pp. 1–21.
 26. Gimatudinov Sh.K. *Fizika neftyanogo i gazovogo plasta* [Physics of oil and gas reservoir]. 2nd ed., revised and expanded. Moscow, Nedra Publ., 1971. 312 p.
 27. Yee C.-T., Stroich A. Flue gas injection into a mature SAGD steam chamber at the Dover project (formerly UTF). *Journal of Canadian Petroleum Technology*, 2004, vol. 43, no. 1, pp. 54–61.

Received: 20 April 2022.

Information about the authors

Aleksandr Ya. Gilmanov, engineer of the second category, University of Tyumen.

Aleksandr P. Shevelev, Cand. Sc., associate professor, professor, University of Tyumen.

УДК 622.24.051

РАЗРАБОТКА АЛМАЗНОГО БУРОВОГО ДОЛОТА ДЛЯ НАПРАВЛЕННОГО БУРЕНИЯ

Нескоромных Вячеслав Васильевич¹,
sovair@bk.ru

Петенёв Павел Геннадьевич¹,
pavel-whait@mail.ru

Лысаков Дмитрий Викторович¹,
lysackovd@yandex.ru

Попова Марина Сергеевна¹,
alleniram83@mail.ru

Головченко Антон Евгеньевич¹,
antong77@yandex.ru

Лиу Баочанг²,
liubc@jlu.edu.cn

¹ Сибирский федеральный университет,
Россия, 660095, г. Красноярск, пр. им. газеты «Красноярский рабочий», 95.

² Университет Цзилинь,
Китай, 130061, г. Чанчунь, ул. Химинжу, 938.

Актуальность. Многолетний опыт работ по направленному бурению позволил выявить сложные горно-геологические условия, в которых использование отклонителей приводит к снижению результативности искривления и авариям. Так, например, раскрепление отклонителей непрерывного действия в твердых, очень твердых и абразивных горных породах, когда диаметр скважины имеет минимальную разработанность по диаметру, приводит к заклиниванию породоразрушающего инструмента. В этом случае повысить эффективность работы отклонителей сложно в связи с отсутствием специальных технических средств и эффективных технологий искривления скважин, что делает проблему снижения эффективности работы отклонителей актуальной и требующей решения.

Цель: поиск и анализ причин заклинивания отклонителей асимметричного и комбинированного типов при постановке и раскреплении в скважинах, пробуренных в твердых горных породах, разработка конструкции алмазного бурового долота со специальной схемой расположения бокового и торцевого вооружения и оценка влияния эксцентриситета режущей части бурового инструмента на эффективность проработки ствола скважины по диаметру.

Объект: эксцентриситет режущей части бурового инструмента.

Методы: сбор, анализ и обобщение данных из литературных источников, аналитическое исследование и экспериментальные опытные работы.

Результаты. Описаны причины, вызывающие заклинивание отклонителя в скважине, представлены существующие технологии, позволяющие решить проблему заклинивания долота при раскреплении отклонителя, разработана конструкция алмазного бурового долота со специальной схемой размещения торцевого и бокового вооружения и описан принцип работы, проведена оценка влияния эксцентриситета режущей части на процесс проработки скважины по диаметру, и установлен факт повышения фрезерующей способности долота.

Ключевые слова:

Бурение, искусственное искривление скважины, отклонитель, фрезерование, эксцентриситет, долото.

Введение

При бурении в твердых горных породах применение отклонителей непрерывного действия (ОНД) асимметричного и комбинированного типа затруднено проблемой заклинивания породоразрушающего инструмента (ПРИ), проявляющегося в процессе раскрепления устройства.

Как правило, такое явление прежде всего связано с тем, что в твердых и очень твердых горных породах вследствие повышенного износа торцевого и бокового вооружения алмазного инструмента не соблюдается проектный диаметр скважины. В интервалах, пробуренных изношенным инструментом, скважина по-

лучает некоторое заужение, что отражается на работе снаряда на забое [1–3].

Если не проводить мер по контролю диаметра породоразрушающего инструмента, то спуск и раскрепление ОНД в зауженном интервале скважины может привести к сложной аварийной ситуации, вызванной заклиниванием породоразрушающего инструмента при его перекосе. В то же время даже при соблюдении номинального диаметра скважины при закреплении ОНД может произойти защемление долота, что связано с необходимостью перекоса породоразрушающего инструмента при постановке ОНД на забой в рабочем положении.

Передача крутящего момента на заземленное долото приводит к повышенной деформации вала отклонителя. А в случае, когда сила зацепления фрезерующего вооружения с горной породой выше, чем сила зацепления распорного устройства со стенкой скважины, происходит проворот корпуса отклонителя и нарушение ориентации снаряда. В некоторых ситуациях, когда силы зацепления долота и распорного механизма очень сильны и их величина примерно равна, может произойти поломка вала отклонителя.

Существующие типы отклонителей можно разделить на две основные группы, включающие отклонители ассиметричного и фрезерующего типа.

Интенсивность набора кривизны отклонителей ассиметричного типа можно представить в виде выражения [4–6]:

$$i_a = \frac{57,3(D_c - d_k)}{l^2},$$

где D_c – диаметр скважины, м; d_k – диаметр корпуса ОНД в месте контакта со стенкой скважины при перекосе, м; l – расстояние от забоя до точки контакта корпуса ОНД со стенкой скважины при перекосе нижней части отклонителя, м.

Интенсивность набора кривизны отклонителей ассиметричного типа напрямую зависит от величины наклона породоразрушающего инструмента относительно оси скважины (обычно угол наклона не превышает 1–2 град).

Для определения интенсивности набора кривизны отклонителем непрерывного действия фрезерующего типа может быть использована следующая зависимость [7–9]:

$$i_\phi = \frac{57,3 \cdot v_\phi}{v_6 \cdot L_{ж}},$$

где v_ϕ , v_6 – скорости фрезерования стенки скважины под действием отклоняющего усилия и углубки забоя, м/ч; $L_{ж}$ – длина жесткой базы отклонителя, м.

Отклонители фрезерующего типа имеют иной принцип работы. Считается, что для этих отклонителей характерно отсутствие перекоса породоразрушающего инструмента на забое в связи с тем, что набор кривизны осуществляется за счет создания отклоняющего усилия, под действием которого долото прижимается к стенке скважины и осуществляет ее фрезерование боковым вооружением. Это суждение не совсем верно, в первую очередь, в связи с тем, что существуют конструкции отклонителей, например, конструкция ТЗ-3, которые способны выполнять набор кривизны за счет одновременного фрезерования стенки скважины и ассиметричного разрушения забоя. При создании отклоняющего усилия, после прижатия бокового вооружения долота к стенке скважины происходит некоторый прогиб вала отклонителя, что приводит к наклону долота на забой.

Проведенное графо-аналитическое исследование позволило установить, что при наклоне долота на 1, 2 и 3 градуса диаметр его матрицы в плоскости, перпендикулярной оси скважины, увеличивается с 76 до 76,43; 76,71 и 77,06 мм соответственно, что в услови-

ях зауженного ствола скважины, когда зазор между боковым вооружением долота и стенкой скважины минимален, приводит к тому, что размер сечения долота при наклоне начинает превышать диаметр скважины и происходит заклинивание.

Вышесказанное позволяет сделать вывод, что для работы и тех и других видов отклонителей требуется наличие наклона породоразрушающего инструмента. Таким образом, проблема заклинивания породоразрушающего инструмента в зауженном интервале скважины характерна для всех конструкций отклонителей непрерывного действия ассиметричного типа и некоторых конструкций отклонителей фрезерующего типа.

Разработка алмазного бурового инструмента для проработки скважины по диаметру в твердых и очень твердых горных породах

Самым простым и доступным способом решения проблемы заклинивания отклонителя в стволе скважины является контроль диаметра породоразрушающего инструмента и своевременная его замена в процессе бурения [10].

В условиях очень твердых горных пород, когда даже при бурении новым породоразрушающим инструментом стенки скважины минимально разработаны по диаметру, для успешного раскрепления ОНД выполняют подготовку ствола таким образом, чтобы оно имело возможность свободного перекоса. С этой целью производят расширение диаметра скважины на высоту 5–10 см над забоем.

Следует отметить, что подготовка скважины должна осуществляться породоразрушающим инструментом, форма торцевой части которого аналогична инструменту, который планируется использовать в составе отклонителя при искривлении. При этом идеальным условием подготовки является использование одного и того же инструмента для проработки и искривления скважины.

Проведенные в Иркутском политехническом институте исследования позволили установить, что для расширения ствола скважины может использоваться долото двухшарошечное ассиметричное (ДДА). Конструктивной особенностью ДДА является ассиметрия размеров шарошек. Такая геометрическая специфика обеспечивает неравную площадь опоры вооружения долота на забой. Это значит, что долото в процессе работы находится в состоянии некоторого перекоса и под действием изгибающего момента прижимается к стенке скважины лапой шарошки, имеющей больший размер. В результате реализуется возможность на малом интервале бурения при приложении повышенной осевой нагрузки разработать диаметр скважины на 1–2 мм. [11].

Несмотря на способность вести достаточно эффективную проработку ствола скважины, использование ДДА в твердых и очень твердых горных породах приводит к снижению ресурса до 1–3 м и со временем к потере фрезерующей функции [12]. К тому же, работа долота в наклоненном относительно оси скважины состоянии приводит к тому, что буровая компоновка всегда деформирована. Такое рабочее положение

снаряда увеличивает нагрузки на резьбовые соединения, что может привести к их усталостному разрушению [13, 14].

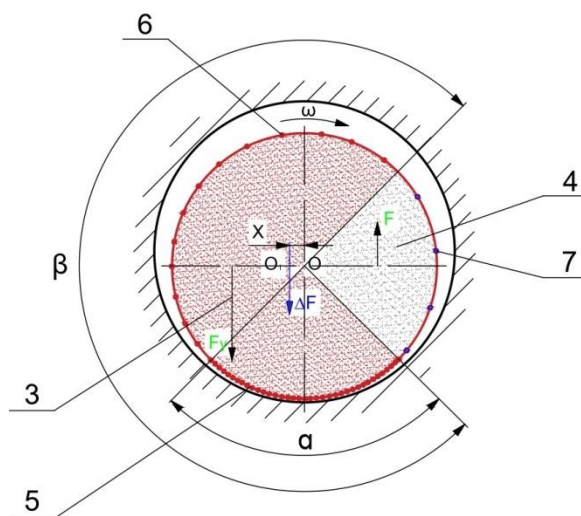


Рис. 1. Торцевая часть алмазосодержащей матрицы долота со специальной схемой размещения вооружения: 3 – участок долота, имеющий стандартное насыщение алмазными резцами; 4 – участок долота, имеющий насыщение алмазными резцами меньше стандартного; 5 – фрезерующее вооружение, имеющее повышенное насыщение алмазными резцами; 6 – фрезерующее вооружение, имеющее стандартное насыщение резцами; 7 – фрезерующее вооружение, имеющее насыщение меньше стандартного; α – угол, обозначающий зону усиленного фрезерующего вооружения; β – угол, обозначающий зону фрезерующего вооружения со стандартной насыщенностью

Fig. 1. End part of a diamond-containing matrix of a bit with a special arrangement of the cutting structure: 3 – section of a bit with a standard saturation with diamond cutters; 4 – section of a bit with a saturation of diamond cutters less than the standard one; 5 – milling cutter with an increased saturation with diamond cutters; 6 – milling cutter having a standard saturation with cutters; 7 – milling cutters with a saturation less than standard; α – angle denoting the zone of a reinforced milling cutter; β – angle denoting a zone of a milling cutter with a standard saturation

В связи с этим актуальным является вопрос создания такого бурового инструмента, которое при бурении не будет иметь недостатков, характерных для ДДА, при этом позволит также эффективно выполнять проработку зауженного ствола скважины.

В результате научных исследований была разработана и впоследствии запатентована конструкция алмазного долота, матрица которого условно разделена на основную – 3 и дополнительную части – 4 (рис. 1). При этом основная часть – 3 алмазной матрицы имеет стандартное насыщение алмазами и ограничена углом β , а дополнительная часть – 4 имеет меньшее насыщение алмазами.

Матрица долота по периметру имеет боковое фрезерующее вооружение, которое также обладает неравномерным насыщением алмазами и может быть разделено на три части: часть стандартного вооружения – 6, усиленного – 5, обладающего большей насыщенностью алмазными резцами, и часть, имеющая меньшую насыщенность алмазами – 7. При этом усиленная (наиболее насыщенная алмазами) часть бокового вооружения ограничена углом α .

Для расчетов насыщенности алмазами участков долота используется следующая зависимость [15]:

$$N = \frac{V_a}{V_m} \cdot 100 \%,$$

где N – насыщенность алмазами матрицы; V_a – объем алмазов в матрице, см^3 ; V_m – объем матрицы, см^2 .

Как известно, насыщенность матрицы в основном зависит от зернистости алмазов. В современных однослойных и импрегнированных матрицах этот показатель варьируется в пределах от 10 до 1200 шт/карат. При изготовлении бурового инструмента на выбор степени зернистости и насыщенности матрицы, как правило, оказывает влияние твердость планируемых к разрушению горных пород.

Разрушение горных пород долотом осуществляется за счет приложения осевого усилия и крутящего момента, которое воспринимается от вышенаходящейся буровой колонны (рис. 1). В связи с тем, что торец матрицы разделен на участки с различной насыщенностью алмазными резцами, в процессе работы возникает неуравновешенность реакций сил резания – скалывания породы резцами F и F_y , вследствие чего появляется равнодействующая сил резания – скалывания ΔF , которая смещена от геометрической оси торца долота O на некоторое расстояние X . В этом случае точка O_1 становится центром мгновенного вращения долота. В результате такого распределения сил долото начинает вращаться, прижавшись к стенке скважины основным фрезерующим вооружением, активно прорабатывая стенку скважины [16].

Таким образом, за счет наличия эксцентриситета режущей части торца алмазосодержащей матрицы осуществляется расширение и проработка ствола скважины алмазным долотом полученной конструкции.

Оценка влияния эксцентриситета режущей части алмазного бурового долота на способность прорабатывать зауженный ствол скважины

Влияние эксцентриситета режущей части торца матрицы алмазного долота на фрезерующую способность может быть оценено через потерю диаметра керна при бурении породоразрушающим инструментом с неравномерным насыщением алмазами режущей части торца матрицы. В этом случае разность величины диаметра керна, полученного породоразрушающим инструментом с эксцентриситетом d_1 , и диаметра керна, полученного при бурении стандартным породоразрушающим инструментом d , будет свидетельствовать о степени фрезеровании стенки скважины (рис. 2).

Для определения фрезерующей способности алмазного породоразрушающего инструмента были проведены исследования на буровом стенде. В состав сконструированного под эту задачу стенда входил станок СКБ-4, буровой насос НБ-3, зумпф и средства для установки и фиксирования блока горной породы [17, 18].

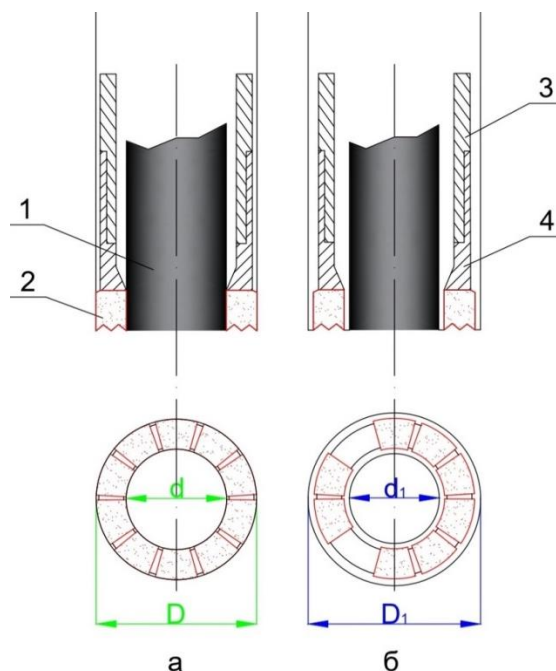


Рис. 2. Процесс бурения скважины стандартным породоразрушающим инструментом (а) и специальным инструментом с удаленными секторами матрицы (б): 1 – керн; 2 – алмазосодержащая матрица; 3 – расширитель; 4 – корпус алмазной коронки; d и d_1 – диаметры керна, пробуренные стандартным инструментом и инструментом, имеющим эксцентриситет; D и D_1 – диаметры скважины, пробуренные стандартным инструментом и инструментом с эксцентриситетом

Fig. 2. Drilling a well with a standard rock cutting tool (a) and a special tool with remote matrix sectors (b): 1 – core; 2 – diamond matrix; 3 – expander; 4 – diamond core bit body; d and d_1 – core diameters drilled with a standard tool and an eccentric tool; D and D_1 – borehole diameters drilled with standard and eccentric tools

Станок был размещен на эстакаде высотой 2 м. Под вращателем бурового станка располагался закрепленный блок долерита. Буровой стенд оборудован прибором для измерения механической скорости бурения и киловатт метром для измерения мощности, затрачиваемой на бурение, а также динамометром ДОСМ-3-3 для тарировки показателей штатного дриллометра станка СКБ-4 [19].

Экспериментальные исследования проводились двумя типами алмазных импрегнированных коронок: со стандартной формой торца матрицы и с эксцентриситетом режущей части торца матрицы.

Далее полученные данные обрабатывались с помощью методики полного факторного эксперимента

[20]. В качестве откликов были приняты некоторые параметры, характеризующие процесс бурения, такие как механическая скорость бурения v_m , м/ч; углубление за один оборот $h_{об}$, мм/об; энергоёмкость N/v_m , кВт ч/м; диаметр керна d_k , мм; мощность N , кВт; угол, характеризующий смещение точки контакта корпуса коронки со стенкой скважины, Δ , град.

В качестве факторов, оказывающих влияние на процесс бурения, приняты: осевое усилие $P_{ос}$, даН, которое устанавливалось равным 1000 и 1400 даН, и частота вращения ω , $мин^{-1}$ – 435 и 710 $мин^{-1}$.

Выбранное как достаточное число опытов N составило 4. Сочетания данных параметров позволили реализовать четыре режима бурения: режим № 1 ($\omega=435$ $мин^{-1}$; $P_{ос}=1000$ даН); режим № 2 ($\omega=435$ $мин^{-1}$; $P_{ос}=1400$ даН); режим № 3 ($\omega=710$ $мин^{-1}$; $P_{ос}=1000$ даН); режим № 4 ($\omega=710$ $мин^{-1}$; $P_{ос}=1400$ даН). В процессе лабораторного бурения, в соответствии с методикой полного факторного эксперимента, были использованы четыре варианта сочетания параметров режима, для которых получены соответствующие значения вышеуказанных параметров [8]. Далее, следуя методике полного факторного эксперимента, было установлено четыре сочетания режимных параметров бурения, при которых производилось бурение и получены значения соответствующих откликов.

Для исследования работы инструмента, обладающего поверхностью с эксцентриситетом, и соблюдения однородных условий после бурения стандартной алмазной коронкой у данного породоразрушающего инструмента было удалено два алмазосодержащих сектора (рис. 2, б) и произведено повторное бурение по той же породе на аналогичных параметрах режима.

Результаты проведенного эксперимента представлены в табл. 1. Замеры диаметров керна были выполнены штангенциркулем, имеющим точность измерения до 0,05 мм.

Таблица 1. Зависимость диаметра керна при бурении стандартной коронкой и коронкой, имеющей эксцентриситет

Table 1. Core diameter versus drilling with standard and eccentric drill bit faces

Буровой раствор Drilling fluid	Торец алмазной коронки End face of diamond crown	Диаметр керна, мм Core diameter, mm
Тех. вода Technical water	Стандартный Standard	61,25
Раствор ПАВ Surfactant solution	Стандартный Standard	61,40
Тех. вода Technical water	Эксцентричный Eccentric	61,00
Раствор ПАВ Surfactant solution	Эксцентричный Eccentric	61,25

Из табл. 1 следует, что уменьшение диаметра керна при бурении коронкой с эксцентриситетом режущей части торца матрицы приводит к боковому фрезерованию керна, при этом очевидно, что аналогичное расширение по диаметру получит и ствол скважины, что в дальнейшем может быть использовано

для проработки интервала установки отклонителя (рис. 2, б).

Построенная эмпирическая модель с учетом влияния представленных ранее выделенных факторов позволила установить величину влияния осевого усилия и частоты вращения коронки на диаметр керна и, соответственно, на фрезерующую способность алмазного породоразрушающего инструмента:

$$d_k = 61,025 - 0,025 P_{oc} - 0,05 \omega.$$

В данном случае следует отметить, что частота вращения оказывает в 2 раза большее влияние на фрезерование керна, чем осевая нагрузка. Отсюда следует, что именно этот параметр режима бурения имеет наибольшее влияние на коэффициент сопротивления резанию–скалыванию породы μ_k (рис. 3) [12].

Коэффициент сопротивления резанию–скалыванию породы алмазными резами μ_k напрямую связан с результирующей силой F и может быть найден по следующей формуле:

$$\mu_k = \frac{\pi(h + 0,25\sqrt{dh})^2 n_p}{2tg\gamma_{ск} P_{oc}} = \sigma_{ск} + f.$$

где h – глубина внедрения в породу алмазного реза, м; d – диаметр алмазного реза, м; n_p – число активно работающих резцов; $\sigma_{ск}$ – предел прочности на скалывание породы, Па; $\gamma_{ск}$ – угол скалывания породы перед передней гранью реза, град; P_{oc} – осевая нагрузка, даН; f – коэффициент трения резцов коронки о забой.

Усилие резания–скалывания породы алмазными резами коронки при бурении можно определить, используя следующую формулу [18]:

$$F_p = \mu_k P_{oc}.$$



Рис. 3. Зависимость диаметра керна (мм) от осевой нагрузки P (даН) и частоты вращения ω (об/мин) при бурении инструментом с эксцентриситетом режущей части торца матрицы

Fig. 3. Dependence of the core diameter (mm) on the axial load P (daN) and rotation frequency ω (rpm) when drilling with a tool with an eccentricity of the cutting part of the die end

Таким образом, вызванное дисбалансом торца опытной коронки усилие F может быть рассчитано по формуле:

$$F = \frac{\pi(h + 0,25\sqrt{dh})^2 \sigma_{ск} S_T}{2tg\gamma_{ск} P_{oc}} \left(\frac{n_6}{S_6} - \frac{n_m}{S_m} \right) + f \frac{P_{oc}}{S_T} (S_6 - S_m),$$

где S_T – общая площадь алмазной коронки, м²; S_6 – площадь алмазосодержащих секторов на половине торца коронки с узкими промывочными пазами; S_m – площадь алмазосодержащих секторов на половине торца коронки с широкими промывочными пазами; n_6 , n_m – число алмазных резцов на половинах торцевой части матрицы, разделенных линией О–О без широких промывочных каналов и с широкими промывочными каналами соответственно.

Возникновение результирующей силы F при бурении коронкой с эксцентриситетом режущей части торца матрицы (рис. 4) аналогично возникновению данной силы у долота, представленного на рис. 1. Так как геометрически торец алмазного долота представляет собой окружность, формулу площади торцевой части долота можно выразить как:

$$S_d = 3,14 R_d^2 K_n,$$

где R_d – радиус алмазосодержащей матрицы долота; K_n – коэффициент, учитывающий площадь промывочных каналов долота.

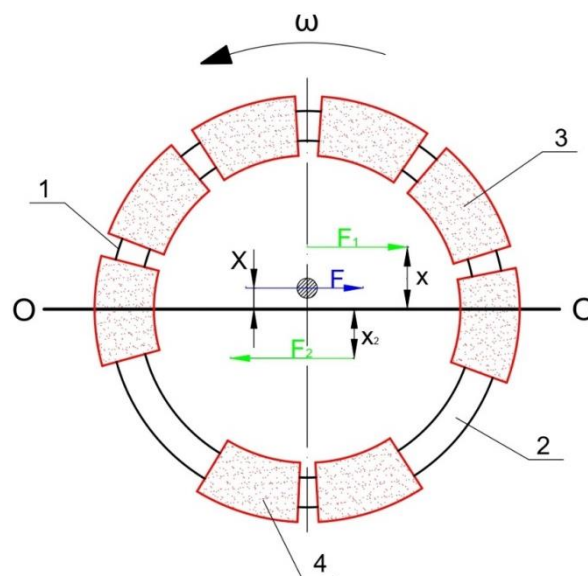


Рис. 4. Схема торца опытной коронки с распределением усилий резания–скалывания породы: X , x_1 , x_2 – расстояния от центральной оси О–О до центров тяжести торца матрицы и половинок торца матрицы; F , F_1 , F_2 – усилия резания–скалывания породы: результирующее и соответственно для частей торца матрицы по обе стороны от центральной оси О–О

Fig. 4. Diagram of the end face of the experimental crown with the distribution of the cutting–chipping forces of the rock: X , x_1 , x_2 – distances from the central axis О–О to the centers of gravity of the end face of the matrix and halves of the end face of the matrix; F , F_1 , F_2 – cutting–chipping forces of the rock: resulting and, accordingly, for parts of the end of the matrix on both sides of the central axis О–О

Тогда для определения дисбалансной силы при бурении долотом, имеющим эксцентриситет режущей части торца матрицы, можно воспользоваться следующим выражением:

$$F = \frac{\pi(h + 0,25\sqrt{dh})^2 \sigma_{ск} S_d}{2tg\gamma_{ск} P_{oc}} \left(\frac{n_6}{2,35R_d^2 K_n} - \frac{n_m}{0,785R_d^2 K_n} \right) \times \times f \frac{P_{oc}}{S_d} (2,35R_d^2 K_n - 0,785R_d^2 K_n),$$

где R_d – радиус торца долота; S_d – площадь алмазосодержащей матрицы долота.

По имеющимся данным, согласно представленным теоретическим зависимостям, были произведены расчеты величины дисбалансной силы для алмазных коронок и долот с эксцентриситетом режущей части торца при бурении в сланцах. Полученные данные представлены в табл. 2.

Таблица 2. Результаты расчетов дисбалансной силы

Table 2. Results of unbalanced force calculations

Диаметр, мм/Diameter, mm			
Тип породоразрушающего инструмента Type of rock cutting tool	59	76	96
	F, даН/daN		
Коронка/Diamond crown	42,48	42,52	42,56
Долото/Bit	42,4	42,49	42,62

Исходя из имеющихся результатов, представленных в табл. 2, следует, что величина дисбалансной силы практически не зависит от диаметра породоразрушающего инструмента при их идентичной конструкции. При этом большая часть результирующей силы формируется за счет разности площадей торца долота с большей насыщенностью алмазами и торца долота с меньшей насыщенностью, что подтверждают расчеты, представленные в табл. 3.

Таблица 3. Расчеты дисбалансной силы долота для различных диаметров при различных площадях участков матрицы с меньшей насыщенностью алмазными резами

Table 3. Calculations of the unbalanced bit force for different diameters at different areas of the matrix sections with a lower saturation with diamond cutters

Диаметр, мм/Diameter, mm			
Угол распространения участка матрицы долота, имеющего пониженную насыщенность алмазными резами, град. Angle of propagation section of the bit matrix having a reduced saturation with diamond cutters, deg	59	76	96
	Значения дисбалансной силы F, даН Values of unbalanced force F, daN		
90	42,46	42,49	42,62
108	50,99	51,02	51,05
126	59,49	59,62	59,66
144	67,98	68,01	68,04
162	76,48	76,48	76,54
180	82,80	82,84	82,89

Для улучшения конструкции долота с эксцентриситетом режущей части торца матрицы необходимо определить характер работы долота и места повышенного износа инструмента в процессе бурения и фрезерования интервала установки отклонителя.

Для определения точек максимального контакта наружной поверхности корпуса алмазной коронки были проведены стендовые испытания, в ходе которых наблюдался износ боковой наружной поверхно-

сти. Для решения поставленной задачи на корпус коронки методом сварки были выполнены восемь наплавов размером 1,5×1,5 см (рис. 5). При этом высота наплавов не превышала величину радиального зазора. Пятно контакта буровой коронки со стенкой скважины определялось по величине износа наплавов.

Уровень износа наплавов на буровом инструменте на каждом этапе экспериментальных исследований представлен в виде высоты износа и приведен в табл. 4.

Таблица 4. Величины износа наплавов на корпусе алмазной коронки КИТ (коронка с измененным торцом матрицы)

Table 4. Values of wear of surfacing on the MDC (modified diamond crown) bit body

№ наплавки на корпусе коронки No. of surfacing on the body of the bit	Исходная высота наплавки, мм Initial surfacing height, mm	Величина износа наплавов на корпусе коронки, мм Value of wear of surfacing on the body of the crown, mm			
		Режим/Mode			
		1 $\omega=435$ мин ⁻¹ (min ⁻¹); $P_{oc}=1000$ даН (daN)	2 $\omega=435$ мин ⁻¹ (min ⁻¹); $P_{oc}=1400$ даН (daN)	3 $\omega=710$ мин ⁻¹ (min ⁻¹); $P_{oc}=1000$ даН (daN)	4 $\omega=710$ мин ⁻¹ (min ⁻¹); $P_{oc}=1400$ даН (daN)
1	0,773	0,142	0,094	0,016	0,02
2	0,701	0,073	0,031	0,033	0,003
3	0,532	0,032	0,044	0,004	0,023
4	0,582	0,039	0,003	0,105	0,025
5	0,432	0,002	0,003	0,004	0,002
6	0,547	0,03	0,02	0,009	0,101
7	0,863	0,043	0,072	0,134	0,111
8	0,698	0,084	0,117	0,108	0,038

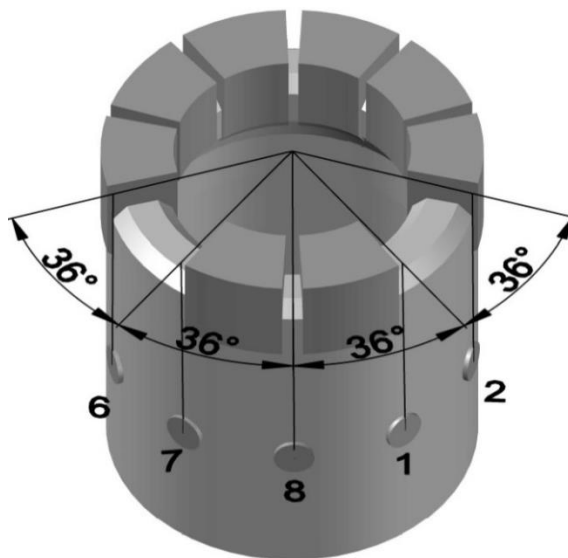


Рис. 5. Схема расположения наплавов на корпусе опытной коронки КИТ: 1, 2, 6, 7, 8 – наплавки

Fig. 5. Layout of surfacing on the body of the MDC experimental bit: 1, 2, 6, 7, 8 – surfacings

Анализ результатов экспериментов показал, что зона контакта матрицы и корпуса опытной коронки со стенкой скважины наблюдается со стороны половины торца матрицы с меньшей площадью алмазосо-

державших секторов. При режимных параметрах бурения 1 точка прилегания коронки совпадает с наплавкой № 1. По мере повышения осевой нагрузки и частоты вращения зона контакта смещается от наплавки № 1 к наплавке № 8, 7 и 6 (рис. 5) [16].

Экспериментальные данные по анализу влияния режимных параметров бурения на смещение точки контакта обрабатывались по методике ПФЭ при бурении долерита стандартной и экспериментальной коронками. В качестве отклика принят угол смещения пятна контакта Δ . За начальную точку отсчета смещения угла Δ было принята наплавка № 2, расположение которой совпадает с краем первого по направлению вращения коронки широкого промывочного паза. Другой крайней точкой угла Δ принята наплавка № 6. Влияющими на угол Δ факторами являются осевая нагрузка P_{oc} и частота вращения ω . При обработке данных эксперимента с опытной коронкой была получена математическая модель зависимости угла смещения Δ контакта матрицы и корпуса коронки от параметров режима бурения.

Полученная модель имеет вид:

$$\Delta = 81,5 + 13,5 P_{oc} + 28,5 \omega - 3,5 P_{oc} \omega.$$

Модель показывает, что осевое усилие оказывает меньшее влияние на смещение пятна контакта, чем частота вращения. Также полученная модель не противоречит представленным ранее данным о влиянии режимных параметров бурения на износ керна под действием результирующей силы F . Кроме того, установлено, что несбалансированная сила сопротивления резанию–скалыванию породы резцами экспериментальной буровой коронки приводит к повышению силы прижатия коронки к стенке скважины, а также влияет на поворот коронки под действием изменяющихся внешних сил резания–скалывания породы и прижатия ее к стенке скважины.

Основываясь на полученной информации о местоположении контакта корпуса алмазной коронки со

стенкой скважины, а также учитывая аналогичный характер формирования результирующих сил, реализуемых алмазной коронкой и долотом, следует отметить необходимость усиления бокового вооружения долота именно в местах действия дисбалансной силы F , которая концентрируется в пределах выделенного угла α . Полученный научный результат учтен при разработке конструкции долота, показанной на рис. 1.

Выводы

Проведенное научное исследование способствовало разработке конструкции алмазной коронки, обладающей эксцентриситетом центра тяжести, и позволяет сделать следующие выводы:

1. Для проработки интервала постановки отклонителя большего эффекта можно достичь, применяя породоразрушающий инструмент, обладающий эксцентриситетом центра тяжести торца матрицы.
2. Эксцентриситета работы алмазного породоразрушающего инструмента можно добиться за счет неравномерного насыщения его режущей поверхности алмазами.
3. Для достижения максимальной скорости фрезерования необходимо соблюдение условия наибольшей разности площадей участков большей и меньшей насыщенности алмазами, а также бурение с максимально возможной частотой вращения.
4. Использование для проработки ствола скважины алмазного инструмента с эксцентриситетом режущей части торца матрицы способствует созданию геометрии забоя, при которой будет исключаться заклинивание долота при постановке отклонителей непрерывного действия.
5. Для повышения ресурса коронок с эксцентриситетом режущей части торца матрицы усиление бокового вооружения долота необходимо производить в местах действия дисбалансной силы, т. е. в пределах выделенного угла α .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Evaluation and prediction of drilling wear based on machine vision / G. Peng, Z. Chuanmin, Y. Yiqing, W. Yinyue // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2021. – V. 114 (11). – P. 2055–2074.
2. Che D., Zhu W.-L., Ehmman K.F. Chipping and crushing mechanisms in orthogonal rock cutting // *International Journal of Mechanical Sciences*. – 2016. – № 119. – P. 224–236.
3. A novel method for measuring and analyzing the interaction between drill bit and rock / X. Wang, Z. Wang, D. Wang, L. Chai // *Measurement*. – 2018. – № 121. – P. 344–354.
4. Toolface control method for a dynamic point-the-bit rotary steerable drilling system / W. Wang, Y. Geng, N. Wang, X. Pu, J. de Oliveira Fiaux // *Energies*. – 2019. – № 12. – P. 1–20.
5. Study on a new steering mechanism for point-the-bit rotary steerable system / Y. Li, W. Niu, H. Li, Z. Luo, L. Wang // *Advances in Mechanical Engineering*. – 2014. – V. 697–698. – P. 1–20.
6. Chi Z., Wei Z. Overview of rotary steerable system and its control methods // *International Conference on Mechatronics and Automation*. – 2016. – V. 1 – P. 1559–1565.
7. Шраго Л.Г., И.М. Юдборовский. Искривление скважин под действием постоянной по величине отклоняющей силы // *Методика и техника разведки*. – 1964. – Вып. 49. – С. 47–51.
8. Epikhin A., Zhironkin V. Method for determining the loads on the deflection module of the push-the-bit rotary steerable system //

- IOP Conference Series Earth and Environmental Science. – 2021. – № 1. – P. 1–7.
9. Prediction model of build rate of push-the-bit rotary steerable system / M. Wang, X. Li, G. Wang, W. Huang, Y. Fan, W. Luo, J. Zhang, X. Shi // *Mathematical problems in engineering*. – 2020. – V. 2020 – P. 1–9.
10. Оценка влияния абразивности горных пород на параметры породоразрушающих машин / А.Б. Жабин, А.В. Поляков, Е.А. Аверин, Ю.Н. Линник, В.Ю. Линник // *Записки горного института*. – 2019. – Т. 240. – С. 621–627.
11. Нескоромных В.В. Проходка направленных скважин в сложных геологических условиях с применением растворов на основе отходов химпредприятий: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Иркутск, 1985. – 69 с.
12. Шигин А.О., Шигина А.А. Прогнозируемый ресурс шарошечных долот при бурении сложноструктурных горных массивов // *Вестник ИрГТУ*. – 2014. – Т. 84. – № 1. – С. 29–33.
13. Фомин О. ССК: Усталостное разрушение буровых труб, его прогнозирование и профилактика // *Rogtec. Бурение*. – 2016. – № 52. – С. 62–79.
14. Александров А.В., Потапов В.Д., Державин Б.П. Сопротивление материалов. – М.: Изд-во «Высшая школа», 2003. – 560 с.
15. Алмазная коронка для компоновки бурового снаряда: пат. Рос. Федерация, № 2078193, заявл. 21.07.1993; опубл. 27.04.1997. Бюл. № 33. – 5 с.

16. Алмазное долото: пат. Рос. Федерация, № 190484, заявл. 06.03.2019; опубл. 02.07.2019. Бюл. № 19. – 4 с.
17. Головченко А.Е. Разработка новых технических средств и технологии ударно-вращательного бурения на основе использования внецентренных ударных импульсов: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М., 2021. – 118 с.
18. Бухаров А.А. Опыт применения КНБК в условиях Северной Карелии // Научно-технический сборник ВИЭМС. – 1991. – № 2. – С. 141–146.
19. Петенев П.Г. Исследование и совершенствование компоновки бурильной колонны для повышения эффективности бурения геологоразведочных скважин: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М., 2016. – 179 с.
20. Сулакшин С.С., Кривошеев В.В., Рязанов В.И. Методическое руководство по направленному бурению геологоразведочных скважин. – М.: Изд-во «Недра», 1978. – 186 с.

Поступила 15.04.2022 г.

Информация об авторах

Нескоромных В.В., доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологии и техники разведки Института горного дела, геологии и геотехнологий Сибирского федерального университета.

Петенёв П.Г., кандидат технических наук, доцент кафедры технологии и техники разведки Института горного дела, геологии и геотехнологий Сибирского федерального университета.

Лысаков Д.В., аспирант, ведущий инженер кафедры технологии и техники разведки Института горного дела, геологии и геотехнологий Сибирского федерального университета.

Попова М.С., доцент кафедры технологии и техники разведки Института горного дела, геологии и геотехнологий Сибирского федерального университета.

Головченко А.Е., доцент кафедры технологии и техники разведки Института горного дела, геологии и геотехнологий Сибирского федерального университета.

Баочанг Л., профессор геоинженерии кафедры разведки и бурения, Университет Цзилинь.

UDC 622.24.051

DEVELOPMENT OF DIAMOND DRILLING BIT FOR DIRECTIONAL DRILLING

Vyacheslav V. Neskoromnykh¹,
sovair@bk.ru

Pavel G. Petenev¹,
pavel-whait@mail.ru

Dmitry V. Lysakov¹,
lysackovd@yandex.ru

Marina S. Popova¹,
alleniram83@mail.ru

Anton E. Golovchenko¹,
antong77@yandex.ru

Liu Baochang²,
liubc@jlu.edu.cn

¹ Siberian Federal University,
95, Krasnoyarskiy rabochiy newspaper avenue, Krasnoyarsk, 660095, Russia.

² Jilin University,
938, Ximinzhū street, Changchun, 130026, China.

The relevance. Many years of experience in directional drilling has made it possible to identify complex mining and geological conditions in which the use of deflectors leads to decrease in the effectiveness of the curvature and accidents. So, for example, the fastening of continuous deflectors in hard, very hard and abrasive rocks, when the borehole diameter has minimum development along the borehole diameter, leads to jamming of the rock cutting tool. In this case, it is difficult to improve the efficiency of diverters due to the lack of special technical means and effective technologies for deviating wells, which makes the problem of reducing the efficiency of diverters relevant and needs to be addressed.

The main aim: search for the causes of jamming of asymmetric and combined diverters when setting and breaking out in wells drilled in hard rocks; development of a diamond drill bit design with a special layout of lateral and end cutting structure; assessment of the effect of eccentricity of the cutting part of a drilling tool on the efficiency of drilling a wellbore according to diameter.

Object: eccentricity of the cutting part of the drilling tool.

Methods: collection, analysis and generalization of the data in literary sources, analytical research and experimental work.

Results. The paper describes the causes of the whipstock jamming in the well and introduces the existing technologies that allow solving the given problem. The authors developed a diamond drill bit of special design and described the principle of its operation. The influence of the cutting part eccentricity on drilling the hole in diameter is assessed and the fact of increasing the milling ability is established.

Key words:

Drilling, artificial well deviation, diverter, milling, eccentricity, bit.

REFERENCES

- Peng G., Chuanmin Z., Yiqing Y., Yinyue W. Evaluation and prediction of drilling wear based on machine vision. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2021, vol. 114 (11), pp. 2055–2074.
- Che D., Zhu W.-L., Ehmann K.F. Chipping and crushing mechanisms in orthogonal rock cutting. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2016, no. 119, pp. 224–236.
- Wang X., Wang Z., Wang D., Chai L. A novel method for measuring and analyzing the interaction between drill bit and rock. *Measurement*, 2018, no. 121, pp. 344–354.
- Wang W., Geng Y., Wang N., Pu X., De Oliveira Fiaux J. Toolface control method for a dynamic point-the-bit rotary steerable drilling system. *Energies*, 2019, no. 12, pp. 1–20.
- Li Y., Niu W., Li H., Luo Z., Wang L. Study on a new steering mechanism for point-the-bit rotary steerable system. *Advances in Mechanical Engineering*, 2014, vol. 697–698, pp. 1–20.
- Chi Z., Wei Z. Overview of steerable system and its rotary control methods. *International Conference on Mechatronics and Automation*, 2016, vol. 1, pp. 1559–1565.
- Shrago L.G., Yudborovsky I.M. Iskrivlenie skvazhin pod deystviem postoyannoy po velichine otklonyayushey sily [Curvature of wells under the action of a constant deflecting force]. *Technique and technique of reconnaissance*, 1964, Iss. 48, pp. 47–51.
- Epikhin A., Zhironkin V. Method for determining the loads on the deflection module of the push-the-bit rotary steerable system. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*, 2021, no. 1, pp. 1–7.
- Wang M., Li X., Wang G., Huang W., Fan Y., Luo W., Zhang J., Shi X. Prediction model of build rate of push-the-bit rotary steerable system. *Mathematical problems in engineering*, 2020, vol. 2020, pp. 1–9.
- Zhabin A.B., Polyakov A.V., Averin E.A., Linnik Y.N., Linnik V.Y. Estimation of abrasiveness impact on the parameters of rock-cutting equipment. *Journal of Mining Institute*, 2019, no. 240, pp. 621–627. In Rus.
- Neskoromnykh V.V. *Prokhodka napravlennykh skvazhin v slozhnykh geologicheskikh usloviyakh c primeneniem rastvorov na osnove otkhodov khimpredpriyatiy*. Avtoreferat Dis. Kand. nauk [Sinking of directional wells in difficult geological conditions using solutions based on waste from chemical enterprises. Cand. Diss. Abstract]. Irkutsk, 1985. 69 p.
- Shigin A.O., Shigina A.A. Predictable resource of cone bits when drilling complex rock massifs. *Bulletin of ISTU*, 2014, vol. 84, no. 1, pp. 29–33. In Rus.

13. Fomin O. CCK: fatigue failure of drill pipes, its prediction and prevention. *Rogtec. Drilling*, 2016, no. 52, pp. 62–79. In Rus.
14. Aleksandrov A.V., Potapov V.D., Derzhavin B.P. *Soprotivlenie materialov* [Strength of materials]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2003. 560 p.
15. Kozlovsky E.A., Buglov N.A., Novozhilov B.A., Karpikov A.V., Poluyanov A.A. *Almaznaya koronka dlya komponovki burovogo snaryada* [Diamond bit for the assembly of a drilling tool]. Patent RF, no. 2078193, 1997.
16. Neskoromnykh V.V., Petenev P.G., Lysakov D.V. *Doloto dlya bureniya* [Diamond chisel]. Patent RF, no. 190484, 2019.
17. Golovchenko A.E. *Razrabotka novykh tekhnicheskikh sredstv i tekhnologiy udarno-vrashchatelnogo bureniya na osnove ispolzovaniya vnestsentremnykh udarnykh impulsov*. Avtoreferat Dis. Kand. nauk [Development of new technical means and technology of percussive-rotary drilling based on the use of eccentric shock pulses. Cand. Diss. Abstract]. Moscow, 2021. 118 p.
18. Bukharov A.A. Opyt primeneniya KNBK v usloviyakh severnoy Karelii [Experience of using BHA in the conditions of North Karelia]. *Scientific and technical collection of VIEMS*, 1991, no. 2, pp. 141–146.
19. Petenev P.G. *Issledovanie i sovershenstvovanie komponovki burilnoy kolonny dlya povysheniya effektivnosti bureniya geologorazvedochnykh skvazhin*. Avtoreferat Dis. Kand. nauk [Research and improvement of the layout of the drill string to improve the efficiency of drilling exploration wells. Cand. Diss. Abstract]. Moscow, 2016. 179 p.
20. Sulakshin S.S., Krivosheev V.V., Ryazanov V.I. *Metodicheskoe rukovodstvo po napravlennoy bureniyu geologorazvedochnykh skvazhin* [Guidelines for directional drilling of exploration wells]. Moscow, Nedra Publ., 1978. 186 p.

Received: 15 April 2022.

Information about the authors

Vyacheslav V. Neskoromnykh, Dr. Sc., professor, head of the department of technology and exploration techniques, Siberian Federal University.

Pavel G. Petenev, Cand. Sc., associate professor, Siberian Federal University.

Dmitry V. Lysakov, postgraduate student, leading engineer, Siberian Federal University.

Marina S. Popova, associate professor, Siberian Federal University.

Anton E. Golovchenko, associate professor, Siberian Federal University.

Liu Baochang, professor, Jilin University.

УДК 622.276

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МНОГОМЕРНЫХ СТАТИСТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ПРИ ОПЕРАТИВНОМ КОНТРОЛЕ ИЗВЛЕКАЕМЫХ ЗАПАСОВ ВИЗЕЙСКИХ ЗАЛЕЖЕЙ ПЕРМСКОГО КРАЯ

Галкин Сергей Владиславович¹,
doc_galkin@mail.ru

Лобанов Дмитрий Сергеевич²,
Dmitrij.Lobanov@pnn.lukoil.com

¹ Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Россия, 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29.

² Филиал ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг» «ПермНИПИнефть» в г. Перми,
Россия, 614015, г. Пермь, ул. Пермская, 3а.

Актуальность. В рамках выполнения ежегодной геолого-экономической оценки запасов согласно международным стандартам при оценке коэффициентов извлечения нефти рекомендовано использовать методы аналогии, в том числе многомерные статистические методы. Используемые в настоящее время статистические модели для месторождений Пермского края построены на основе анализа информации по состоянию на 2008 г. За последнее десятилетие для территории исследования произошло массовое внедрение принципиально новых технологий разработки пластов, значительно повысившее эффективность разработки и достижимые величины проектных коэффициентов извлечения нефти. Соответственно, в современных условиях необходимо уточнение действующих моделей прогноза коэффициентов извлечения нефти.

Цель: актуализация для визейских нефтяных эксплуатационных объектов Пермского края многомерных моделей прогноза коэффициентов извлечения нефти с учетом современного опыта разработки.

Объекты: визейские нефтяные эксплуатационные объекты Пермского края.

Методика. Проведен анализ геолого-технологических показателей разработки, оценено их влияние на утвержденные значения коэффициента извлечения нефти по действующим проектным технологическим документам. В качестве статистических использованы: метод на основе распределения *t*-Стьюдента, корреляционный анализ, метод множественной регрессии. Анализ проводился отдельно для нефтяных залежей, разрабатываемых в условиях реализации системы поддержания пластового давления и на естественном режиме. Результаты статистической оценки коэффициентов извлечения нефти для залежей поздних стадий разработки сопоставлены с утвержденными в проектно-технологических документах.

Результаты. Полученные многомерные статистические модели позволяют оперативно прогнозировать коэффициенты извлечения нефти для визейских залежей, разрабатываемых с поддержанием пластового давления и на естественном режиме. Построение моделей прогноза осуществлено в двух вариантах: на основе геолого-физических показателей для месторождений, находящихся на разведочной стадии (категория запасов C1+C2), и геолого-технологических показателей для разрабатываемых месторождений (категория запасов A+B). Сходимость полученных моделей показала удовлетворительные результаты для объектов поздних стадий. Полученные модели могут быть использованы для оперативного контроля извлекаемых запасов нефти при проектировании разработки и проведении геолого-экономической оценки запасов по международным стандартам.

Ключевые слова:

Аналого-статистические модели, извлекаемые запасы, нефтяные эксплуатационные объекты, стадии разработки, коэффициент извлечения нефти, геолого-технические мероприятия.

Введение

Ценность нефтегазовой компании, прежде всего, обеспечена количеством и качеством запасов разрабатываемых месторождений. Поэтому начиная с середины 90-х годов прошлого века ведущие российские нефтегазовые компании ежегодно представляют данные о запасах нефти и газа на международных фондовых биржах. Это выполняется в рамках ежегодного выполнения геолого-экономической оценки запасов (ГЭОЗ), которая проводится по международным стандартам. Наиболее распространенными при международном аудите являются системы управления запасами углеводородов SPE-PRMS (Petroleum Resources Management System) [1] и SEC (Securities and Exchange Commission). Стандарт SPE-PRMS разработан профессиональным обществом инженеров нефтяников (Society of Petroleum Engineers), стандарт SEC – американской Комиссией по рынку ценных

бумаг и биржам (Securities and Exchange Commission). Результаты ГЭОЗ, помимо международной финансовой отчетности, также используются нефтегазовыми компаниями для задач оперативного контроля состояния запасов углеводородов (УВ) и при стратегическом планировании.

Государственный контроль остаточных извлекаемых запасов (ОИЗ) углеводородов в РФ предусматривает их ежегодное обновление за счет списания с утвержденных запасов годовой добычи УВ. При этом оценка начальных извлекаемых запасов (НИЗ) проводится в рамках новых проектных документов, между утверждением недропользователем которых может проходить 10 и более лет. Утвержденные таким образом НИЗ могут значительно терять актуальность в связи с изменением экономических условий разработки или несоответствием фактических условий разработки проектным. Для достоверной оценки ОИЗ

важно оперативно контролировать их обоснованность, в том числе объективную достижимость добычи УВ в конкретные временные сроки. В отличие от Российской системы при выполнении ГЭОЗ (по стандартам SPE-PRMS и SEC) для эксплуатационных объектов НИЗ пересчитываются ежегодно, что обеспечивает возможность оперативной оценки геологической, технологической и экономической составляющих нефтегазовых проектов.

За годовой период для залежей нефти изменения начальных геологических запасов (НГЗ) обычно незначительны, основной вклад в перерасчет НИЗ вносят изменения в оценке проектных коэффициентов извлечения нефти (КИН). Соответственно, именно оперативный контроль КИН является основой достоверности проведения ГЭОЗ. Задача оперативного прогноза КИН решена в данной работе для визейских терригенных нефтяных залежей, которые в структуре добычи нефти в настоящее время являются главным эксплуатационным объектом для территории Пермского края.

Методы оценки проектных КИН на различных стадиях разработки нефтяных месторождений

Подходы к оценке КИН по российским и международным стандартам имеют ряд принципиальных различий. При государственной оценке в РФ КИН принимается единым по всей залежи, по международным стандартам – отдельно для запасов разных категорий. Для категории доказанных разрабатываемых добываемых запасов PDP (Proved Developed Producing) КИН может рассчитываться на основе факта и прогноза добычи с учетом темпа падения и принятого экономического предела рентабельности. Для хорошо освоенных территорий (например, Волго-Уральская НГП) оценки запасов по международным стандартам PDP в целом близки к российской классификации разрабатываемых месторождений (категории A1+B1+B2). Эксплуатационные объекты с запасами категорий А и В разрабатываются на основе утвержденных проектных технологических документов (ПТД), что предполагает обязательность применения геолого-гидродинамического моделирования (ГТМ), достоверность которого при определении НИЗ категорий А+В высока. В качестве контроля результатов ГТМ на поздних стадиях разработки применяются различные характеристики нефтевытеснения, в основе которых лежат статистические закономерности, как правило, характеризующие динамику обводненности продукции скважин [2–4].

В условиях ранних стадий разработки ввиду низкой разбуренности эксплуатационных объектов применение ГТМ существенно теряет в своей эффективности. Особенно это актуально с учетом высокой стоимости ГТМ и необходимости проведения ежегодной ГЭОЗ. Поэтому при международном аудите для запасов категорий ниже чем PDP оценку КИН рекомендуется выполнять путем подбора залежей-аналогов, критерием чего служит схожесть геолого-физических и технологических показателей разработки одновозрастных отложений с учетом режима разработки [1]. В случае от-

сутствия таких схожих объектов рекомендуется использовать аналого-статистические методы, которые позволяют рассматривать множество однотипных объектов. При государственном контроле запасов в РФ для не введенных в промышленную разработку разведываемых месторождений (категории C1+C2) при оценке КИН действующими руководящими документами также допускается применение аналогичных статистических подходов.

При оценке КИН в Пермском крае длительное время, до 2000-х гг., использовались зависимости, построенные на основе обобщения статистической информации для других нефтегазовых регионов, в том числе применялись методики «КИНГ» [5], «ТатРИТЭКнефть», API (American Petroleum Institute) [6] и ряд других. В работе [7] расчетные значения данных методик сопоставлены для объектов поздних стадий разработки с КИН, полученными на основе ГТМ. В результате установлена низкая сходимость применения зависимостей оценки КИН, полученных для других регионов. Между тем, Пермский нефтегазовый регион в промышленных масштабах разрабатывается более 80 лет, ввиду чего количество однотипных объектов для анализа достаточно для построения собственных («родных») для региона зависимостей.

С учетом этого для выполнения задач ГЭОЗ на основе информации по залежам Пермского региона в 2008 г. построены многомерные статистические модели прогноза КИН, в том числе для визейских терригенных залежей. Зависимости строились отдельно для залежей, разрабатываемых с применением систем поддержания пластового давления (ППД) и на естественном режиме. В обоих случаях получены представительные выборки обучения, 165 объектов использовано при построении статистической модели с ППД и 115 – без ППД. Результаты сопоставления расчетных модельных КИН с утвержденными на 2008 г. показали их высокую сходимость [7].

Анализ динамики изменения структуры утвержденных проектных КИН для визейских залежей Пермского края в 2008 и 2021 гг.

Ввиду длительных сроков разработки нефтяных месторождений Пермского края активные запасы визейских объектов разрабатываются преимущественно при высокой обводненности продукции скважин, а в структуре запасов начальных стадий разработки преобладают трудноизвлекаемые. В целом данная ситуация типична для российских нефтяных месторождений, для которых в структуре ОИЗ около 40 % приурочены к залежам в низкопроницаемых коллекторах, 14 % – к высоковязким нефтям, 34 % – к заводненным зонам [8]. В результате в среднем по месторождениям России проектный КИН эксплуатационных объектов снизился с 0,5 д.е. в 1960-х гг. до 0,3 д.е. к 2009 г. [9]. Вместе с тем в последние десятилетия в России значительно повысился уровень технического обеспечения проведения геолого-технических мероприятий (ГТМ). Одним из ключевых моментов в определении понятия «КИН» является его соответствие «совре-

менному уровню технологии добычи». Таким образом, повышение эффективности ГТМ должно в значительной степени повышать долю извлечения нефти из продуктивных пластов.

В настоящее время результаты работы [7] для месторождений Пермского региона активно используются при выполнении ГЭОЗ, а также для контроля КИН при разработке проектных технологических документов. Одним из главных принципов применения аналого-статистических методов является их актуальность на конкретный временной период. Очевидно, что при существенном изменении технологии добычи прогнозные модели оценки КИН должны своевременно актуализироваться.

С учетом этого необходим сравнительный анализ проектных КИН из ПТД, актуальных на сегодня (2021 г.) и на момент разработки статистических моделей (2008 г.). Такой анализ проводился для визейских залежей нефти Пермского региона отдельно для залежей, разрабатываемых с ППД и на естественном режиме. В анализе, помимо КИН, участвовали геолого-технологические показатели, по которым строились статистические модели: средняя эффективная нефтенасыщенная толщина (h , м), пористость (K_p , д.е.), нефтенасыщенность (K_n , д.е.), проницаемость коллекторов (k , мкм²), вязкость нефти (μ , мПа·с), давление насыщения нефти газом ($P_{нас}$, МПа), газосодержание нефти (G , м³/т), коэффициент вытеснения нефти водой ($K_{выт}$, д.е.), проектная плотность сетки скважин (ПСС, Га/скв).

В табл. 1 для разрабатываемых с ППД визейских эксплуатационных объектов представлены сравнительные показатели геолого-технологических параметров и утвержденных КИН на 2008 и 2021 гг. В анализе участвовало 80 эксплуатационных объектов, для которых за анализируемый период не было существенных изменений в группировании пластов.

Таблица 1. Сравнительные показатели разработки для визейских эксплуатационных объектов, разрабатываемых с поддержанием пластового давления

Table 1. Comparative development indicators for Visean production deposits at pressure maintenance (PM) mode

С ППД PM mode	2008	2021	t-критерий t-value	p	N ₁	N ₂
h , м (m)	4,7	4,9	-0,31	0,76	80	
K_p , д.е. (u.f.)	0,183	0,186	-0,73	0,47		
K_n , д.е. (u.f.)	0,833	0,843	-0,83	0,41		
k , мкм ² (micron ²)	0,319	0,278	0,94	0,35		
μ , мПа·с (mPa·s)	11,5	11,3	0,12	0,91		
$P_{нас}$, МПа (MPa)	10,2	10,3	-0,30	0,77		
G , м ³ /т (m ³ /t)	48,9	55,0	-0,89	0,37		
$K_{выт}$, д.е. (u.f.)	0,622	0,612	1,54	0,13		
ПСС, Га/скв (Ha/well)	27,1	20,9	1,81	0,07		
КИН, д.е. (u.f.)	0,444	0,475	-2,23	0,03		

Для всех рассмотренных характеристик проверена статистическая гипотеза о равенстве средних значений при распределении t-Стьюдента. В результате установлено, что КИН увеличился за анализируемый

период в абсолютном выражении на 0,031 д.е., что привело к увеличению НИЗ на 7 % (0,031/0,444):

- КИН=0,444±0,099 – на 2008 г.;
- КИН=0,475±0,073 – на 2021 г.

В данном случае гипотезу о равенстве средних КИН можно принять на уровне значимости 3 % ($p=0,03$), что показывает статистически значимый прирост КИН.

Между тем, как видно из табл. 1, для всех показателей, характеризующих геологические характеристики залежи нефти, не установлено статистически значимых различий. В некоторой степени на рост КИН за 2008-2021 гг. установлено влияние более плотной проектной сетки скважин, которая уменьшилась с 27,1 до 20,9 Га/скв ($p=0,07$).

В табл. 2 представлены сравнительные геолого-технологические показатели визейских эксплуатационных объектов, разрабатываемых на естественном режиме, за 2008–2021 гг. В данном случае КИН увеличился в абсолютном выражении на 0,057 д.е., что привело к увеличению НИЗ на 17 % (0,057/0,341):

- КИН=0,341±0,117 – на 2008 г.;
- КИН=0,398±0,087 – на 2021 г.

Таблица 2. Сравнительные показатели разработки для визейских эксплуатационных объектов, разрабатываемых на естественном режиме

Table 2. Comparative development indicators for Visean production deposits at natural depletion mode

Без ППД Natural depletion mode	2008	2021	t-критерий t-value	p	N ₁	N ₂
h , м (m)	2,5	3,1	-1,94	0,05	55	
K_p , д.е. (u.f.)	0,179	0,185	-1,15	0,25		
K_n , д.е. (u.f.)	0,817	0,839	-1,44	0,15		
k , мкм ² (micron ²)	0,388	0,363	0,33	0,74		
μ , мПа·с (mPa·s)	14,0	13,3	0,37	0,71		
$P_{нас}$, МПа (MPa)	9,2	9,6	-0,82	0,41		
G , м ³ /т (m ³ /t)	45,7	48,9	-0,31	0,76		
$K_{выт}$, д.е. (u.f.)	0,609	0,595	1,56	0,12		
ПСС, Га/скв (Ha/well)	35,4	33,9	0,37	0,71		
КИН, д.е. (u.f.)	0,341	0,398	-2,91	<0,01		

В анализе участвовало 55 эксплуатационных объектов без изменений в группировании пластов в период с 2008 по 2021 г. Из табл. 2 видно, что гипотезу о равенстве средних КИН можно принять на уровне значимости менее 1 % ($p<0,01$). При этом, согласно распределению t-Стьюдента, для всех рассмотренных геолого-технологических показателей $p>0,05$, что свидетельствует об отсутствии их значимых изменений в рассмотренный временной период.

Обобщая информацию по анализу, можно констатировать что в 2008–2021 гг. для объектов с ППД и без ППД произошло значительное увеличение утвержденных КИН. Причем увеличение не связано с изменением геолого-технологических показателей, по которым строятся статистические модели прогноза КИН. Используемые при ГЭОЗ модели оперативного прогноза КИН в настоящее время не соответствуют современным технологическим условиям разработки и занижают НИЗ в среднем на 7 % для эксплуатаци-

онных объектов с ППД и на 17 % на естественном режиме. Очевидно, что за анализируемый период утвержденные для визейских залежей значения КИН значительно выросли в основном за счет массового внедрения принципиально новых для Пермского региона эффективных технологий.

Анализ влияния динамики геолого-технических мероприятий для визейских нефтяных залежей в период с 2008 по 2021 гг.

Согласно данным работы [10], в 2008 г. в структуре мировой практики применения методов увеличения нефтеотдачи (МУН) более 45 % относилось к водогазовым, более 45 % – к тепловым. Химические технологии составляли всего 6 %. Применение тепловых методов для нефтяных месторождений Пермского края в целом нетипично, т. к. вязкости нефти, как правило, не превышают 40 мПа·с. Кроме этого, мировые тенденции применения МУН последнего десятилетия показывают наиболее активное развитие именно химических технологий.

Основным направлением химических МУН является применение потокоотклоняющих технологий на основе полимеров для снижения обводненности скважин и продления рентабельного срока их эксплуатации [11–13]. Например, согласно данным из работы [14], применение полимерного заводнения на месторождениях Китая за последнюю четверть XX в. позволило получить на некоторых объектах прирост КИН в 10 %. Анализ более современного мирового опыта позволяет говорить о приростах КИН от полимерных технологий порядка 5–10 % [15, 16]. Так, применение полимерного заводнения на одном из визейских объектов Пермского края в 2013–2017 гг. привело к увеличению работающей толщины принимающих пропластков более чем на 50 % [17]. В работе [18] дополнительная добыча нефти для визейских объектов при успешной реализации полимерного заводнения оценивается в 3000 м³ на 1 т полимера. В последние годы для решения задач перераспределения фильтрационных потоков на поздних стадиях разработки месторождений все более активно начинают применяться технологии, не только повышающие вязкость воды, но и способные кольматировать высокопроницаемые обводненные каналы. Одной из таких перспективных технологий, находящей применение в Пермском крае, является закачка через нагнетательные скважины в пласт синтезированных сшитых гелей [19, 20].

Для скважин с низкой обводненностью и значительными ОИЗ основным современным методом повышения КИН, позволяющим вовлечь в разработку недренируемые и низкопродуктивные участки залежей, являются различные модификации пропантного гидроразрыва пласта (ГРП) [21–23]. Для низкопроницаемых коллекторов с целью увеличения эффективного радиуса скважины и высоты трещин применяются многозонные ГРП [24–26]. В целом технология ГРП позволяет с сохранением плотности сетки скважин, в том числе, повысить радиус охвата пласта процессом нефтевытеснения. Объемы операций ГРП для визейских эксплуатационных объектов Пермско-

го края в последние годы ежегодно увеличивались. Согласно данным работ [27, 28], объем проведенных ГРП вырос с единичных операций в 2005 г. до 100 в 2016 г. Средние первоначальные приросты дебитов нефти от ГРП за период составили 4,1 т/сут, в отдельных скважинах – до 19 т/сут [27, 28]. В работе [27] показано, что за счет увеличения количества операций многозонного ГРП с 9 в 2012 г. до 68 в 2018 г. дополнительно получено более 1,3 млн т нефти.

Необходимо заметить, что не все применяемые ГТМ показали высокую эффективность. Так, для перспективной в залежах карбонатных коллекторов технологии радиального бурения [29–31] эффект для трети проведенных ГТМ в визейских объектах Пермского края продолжался менее 1 года, а в 15 % случаев не превысил 2 т [31].

Основной технологией повышения коэффициента охвата процессом вытеснения является бурение боковых стволов. При проектировании в России данная технология также относится к ГТМ ввиду чего не влияет в ПТД на показатели плотности сетки скважин. Бурение боковых стволов для месторождений Пермского края является ключевым мероприятием в структуре дополнительной добычи нефти от проведенных ГТМ [32, 33].

В последнее десятилетие увеличилась доля боковых стволов с горизонтальным окончанием, при котором в значительной мере происходит увеличение дренируемого объема коллектора [34]. При проектировании для расчета дебитов горизонтальных скважин применяются различные методические подходы (Joshi, Борисов, Giger, Григулецкий, по гидродинамической модели) [35, 36]. По данным работы [37] в период с 2012 по 2019 г. на терригенных объектах Пермского края пробурено 70 горизонтальных скважин, дебит которых для визейских объектов в среднем в 1,5–2 раза выше, чем для наклонно-направленных. Технология горизонтального бурения, как правило, на визейских объектах комплексруется с многостадийным гидроразрывом пласта [32, 38]. В Пермском крае также активно развивается технология бурения многоствольных скважин [33, 39], которая обеспечивает рациональную выработку остаточных запасов нефтяных залежей в случае их совмещения в плане с водоохранными зонами или месторождениями других полезных ископаемых. Во всех случаях приобщение к добыче участков, которые ранее не участвовали в процессе дренирования, значительно повышает степень извлечения нефти из продуктивных пластов.

Таким образом, проектные решения, основанные на внедрении новых успешных технологий, позволяют значительно повысить проектный КИН. Ввиду высокой неопределенности информации о геологическом строении месторождения объективное количественное планирование объемов ГТМ на начальных стадиях разработки затруднительно. Более целесообразно применение статистических методов, позволяющих на основе принципа аналогии сопоставить новые эксплуатационные объекты с длительно разрабатываемыми. С учетом значительного роста проектных

КИН действующие на сегодняшний день статистические модели для визейских объектов нуждаются в актуализации и уточнении.

Построение аналого-статистических моделей оценки КИН визейских нефтяных залежей

Построение моделей прогноза КИН проводилось в двух вариантах. Для месторождений, находящихся на разведочной стадии (категория запасов С1+С2), при прогнозе можно использовать только геолого-физические показатели, характеризующие нефтяные залежи. К таким показателям относятся: средняя эффективная нефтенасыщенная толщина (h , м); средняя толщина пропластка ($h_{пр}$, м), рассчитываемая как отношение h к количеству пропластков; пористость (K_p , д.е.), нефтенасыщенность (K_n , д.е.) и проницаемость (k , мкм²) коллекторов; коэффициент песчаности ($K_{пес}$, д.е.); коэффициент расчлененности (K_p , д.е.); доля водонефтяной зоны в площади залежи ($ВНЗ_3$, д.е.); вязкость (μ , мПа·с) и газосодержание (G , м³/т) нефти; начальное пластовое давление ($P_{пл}$, МПа); давление насыщения нефти газом ($P_{нас}$, МПа); содержание парафина в нефти ($ПР$, %); коэффициент вытеснения нефти водой ($K_{выт}$, д.е.).

Для разрабатываемых месторождений (категория запасов А+В) дополнительно можно использовать технологические показатели из утвержденных ПТД:

проектная плотность сетки скважин (ПСС, Га/скв); проектный фонд добывающих скважин (СКВ_д); проектный фонд нагнетательных скважин (СКВ_н); интенсивность заводнения (СКВ_н/СКВ_д, д.е.). Формально даже на разведочном этапе также известен начальный дебит нефти (q_n , т/сут), однако ввиду высокой дисперсии данного показателя по скважинам его участие в моделях значительно усложняет их практическое использование. С учетом этого показатель q_n использовался в анализе в большей степени для контроля полученных результатов.

Раздельно для эксплуатационных объектов, разрабатываемых с ППД и на естественном режиме, с целью определения влияния геолого-физических и технологических параметров на утвержденный КИН построены корреляционные матрицы и проверена статистическая гипотеза о равенстве средних значений при распределении t-Стьюдента.

При построении статистических моделей оценки КИН для залежей, разрабатываемых с ППД, в анализе участвовала информация по 178 объектам. В результате установлено, что наибольшее влияние на КИН имеют следующие геолого-технологические показатели: h ($r=0,50$), $P_{нас}$ ($r=0,24$), $K_{выт}$ ($r=0,50$), ПСС ($r=-0,33$). На рис. 1 приведены поля корреляции и зависимости для данных показателей с проектным КИН.

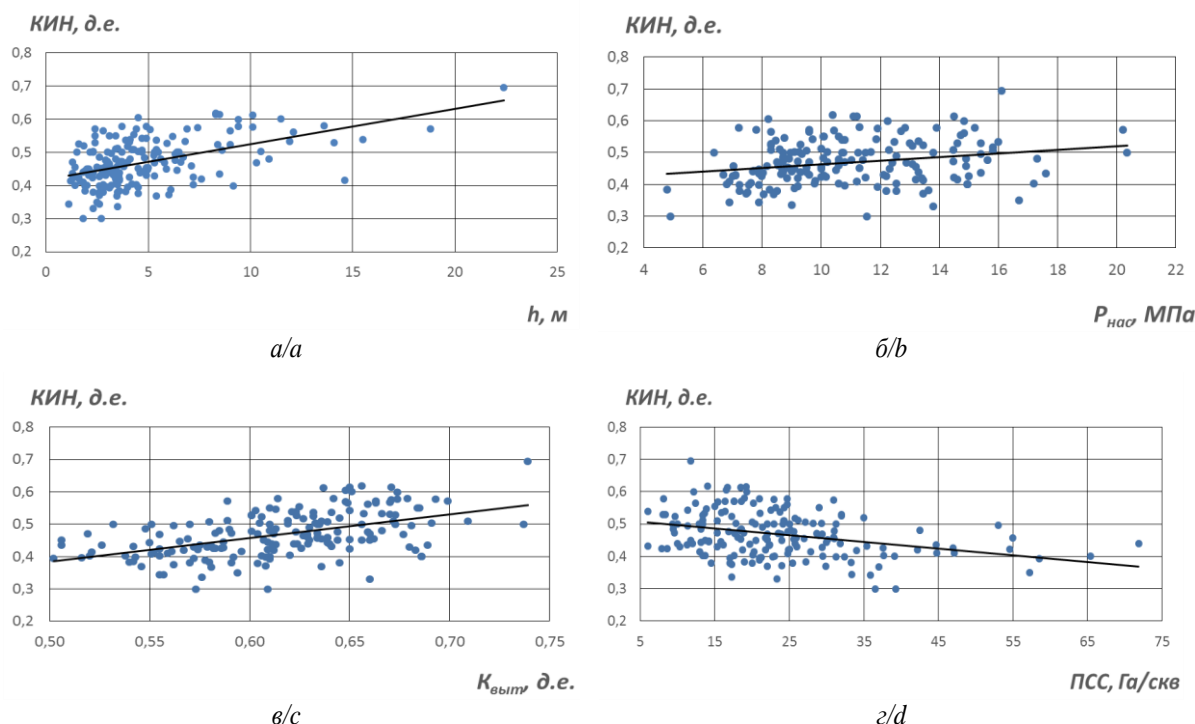


Рис. 1. Зависимости утвержденных КИН от нефтенасыщенной толщины h (а), давления насыщения $P_{нас}$ (б), коэффициента вытеснения $K_{выт}$ (в), проектной плотности сетки скважин ПСС (г) для визейских объектов, разрабатываемых с применением системы поддержания пластового давления

Fig. 1. Dependencies of approved recovery factors on oil thickness (a), saturation pressure (b), displacement ratio (c), well space density (d) for Visayan production deposits at pressure maintenance mode

Для комплексного учета влияющих на КИН показателей применен метод множественной регрессии. При его реализации получаемые статистические мо-

дели контролировались на предмет недопустимости в них использования показателей с противоречием их физического влияния на КИН. Такой эффект обычно

наблюдается при использовании в множественных моделях взаимно коррелированных показателей, примером которых могут служить $R_{нас}$ и G ($r=0,87$ – для залежей с ППД; $r=0,81$ – для залежей без ППД). Один из взаимно коррелированных показателей всегда исключался из многомерных статистических моделей. В результате для объектов с ППД получены модели оценки КИН в двух вариантах:

- при использовании геолого-физических показателей для месторождений с запасами категорий С1 и С2

$$КИН_{геол.} = -0,037 + 0,0062h + 0,874K_{п} + 0,0355K_{н} + 0,015997k - 0,00058\mu + 0,00485P_{нас} + 0,386K_{выт}, \text{ при } R=0,694 \text{ и } n=178.$$

- при использовании геолого-технологических показателей для месторождений с запасами категорий А и В

$$КИН_{техн.} = 0,016 + 0,0043h + 0,407K_{п} + 0,060K_{н} + 0,022182k - 0,00065\mu + 0,0035P_{нас} - 0,001796ПСС + 0,0187СКВ_{н}/СКВ_{д} + 0,496K_{выт}, \text{ при } R=0,723 \text{ и } n=178.$$

Диапазоны применимости параметров для данной модели: h – от 1,1 до 22,4 м; $K_{п}$ – от 0,11 до 0,23 д.е.; $K_{н}$ – от 0,640 до 0,960 д.е.; k – от 0,006 до 1,253 мкм²; μ – от 0,7 до 98,3 мПа·с; $P_{нас}$ – от 4,8 до 20,4 МПа; $K_{выт}$ – от 0,502 до 0,739 д.е.; ПСС – от 6 до 60 Га/скв; $СКВ_{н}/СКВ_{д}$ – от 0,03 до 1,00 д.е.

Для естественного режима разработки в анализе участвовало 173 эксплуатационных объекта. В результате установлено, что наибольшее влияние на КИН имеют следующие геолого-технологические показатели: h ($r=0,30$), $P_{нас}$ ($r=0,22$), $K_{выт}$ ($r=0,43$), ПСС ($r=-0,31$). На рис. 2 приведены зависимости влияния наиболее значимых геолого-технологических показателей на проектный КИН.

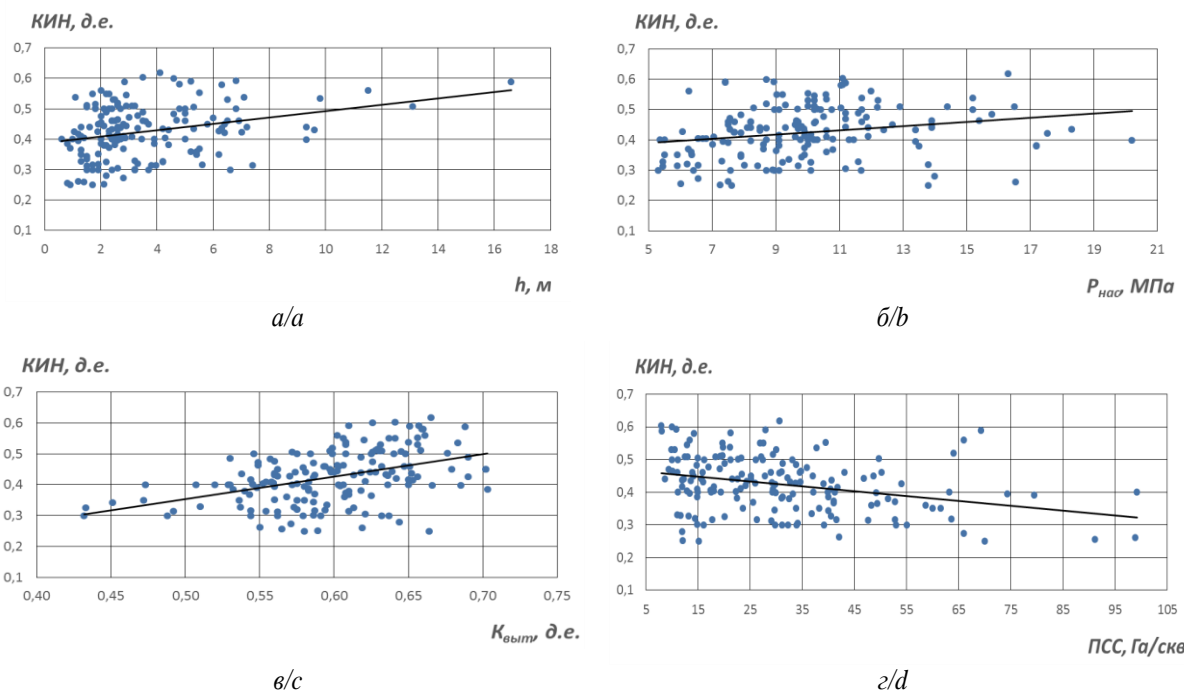


Рис. 2. Зависимости утвержденных КИН от нефтенасыщенной толщины h (а), давления насыщения $P_{нас}$ (б), коэффициента вытеснения $K_{выт}$ (в), проектной плотности сетки скважин (ПСС) (г) для визейских объектов, разрабатываемых на естественном режиме

Fig. 2. Dependencies of approved recovery factors on oil thickness (a), saturation pressure (b), displacement ratio (c), well space density (d) for Visean production deposits at natural depletion mode

В целом для залежей, разрабатываемых без ППД, установлено более слабое влияние на КИН геолого-технологических показателей. В результате для естественного режима получены многомерные модели оценки КИН, которые характеризуются несколько меньшими R в сравнение с моделями для залежей с ППД:

- при использовании геолого-физических показателей для месторождений с запасами категорий С1 и С2:

$$КИН_{геол.} = -0,235 + 0,0035h + 0,0139h_{пр} + 1,415K_{п} + 0,001846k - 0,00077\mu + 0,0105P_{нас} + 0,449K_{выт}, \text{ при } R=0,615 \text{ и } n=173.$$

- при использовании геолого-технологических показателей для месторождений с запасами категорий А и В:

$$КИН_{техн.} = -0,158 + 0,0014h + 0,0147h_{пр} + 1,143K_{п} + 0,005227k - 0,000825\mu + 0,0088P_{нас} - 0,001409ПСС + 0,518K_{выт}, \text{ при } R=0,664 \text{ и } n=170.$$

Диапазоны применимости параметров: h – от 0,6 до 16,6 м; $h_{пр}$ – от 0,1 до 6,5 м; $K_{п}$ – от 0,11 до 0,25 д.е.; k – от 0,007 до 1,827 мкм²; μ – от 0,7 до 153,7 мПа·с; $P_{нас}$ – от 5,3 до 20,2 МПа; $K_{выт}$ – от 0,432 до 0,703 д.е.; ПСС – от 7,9 до 60 Га/скв.

Для поздних стадий разработки, как было показано выше, достоверность результатов ГГМ и, соответственно, оценки утвержденных проектных КИН высока. Поэтому для оценки применимости полученных статистических моделей на практике прове-

дено сопоставление прогнозных расчетов с утвержденными КИН эксплуатационных объектов, для которых выработка запасов нефти и средняя обводненность продукции скважин превышают 40 %. Количество таких залежей с ППД составило 45, на естественном режиме – 27. На рис. 3 приведены гистограммы отклонений величин $KIN_{техн}$, полученных

на основе статистических зависимостей, от утвержденных в ПТД. Достоверность статистических моделей оценивалась по доле объектов с высокой абсолютной величиной отклонений $\pm\Delta KIN$. При значениях $\Delta KIN > 0$ прогноз по статистической модели завышен по сравнению с утвержденным в ПТД, при $\Delta KIN < 0$ занижен.

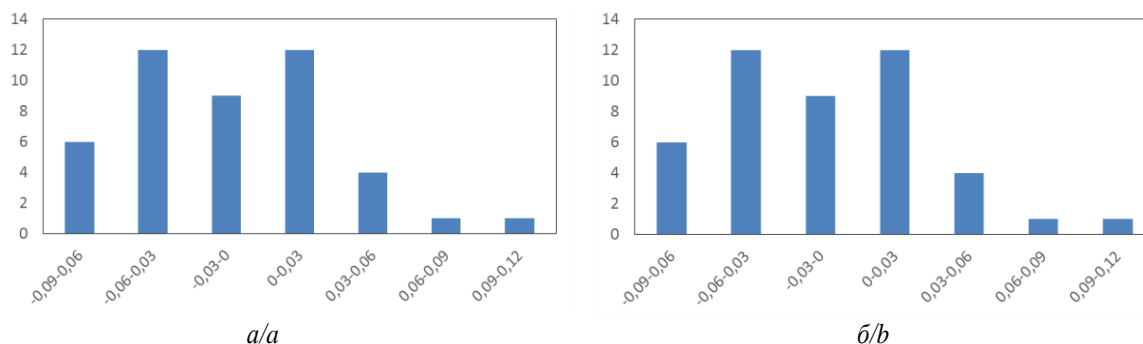


Рис. 3. Гистограммы отклонений КИН на основе статистических зависимостей от утвержденных в ПТД для визейских объектов на поздних стадиях разработки, с применением системы поддержания пластового давления (а) и на естественном режиме (б)

Fig. 3. Bar charts of deviations between statistical recovery factors with technological parameters and approved recovery factors by development design for Visean production deposits at late development stages: a) pressure maintenance mode; b) natural depletion mode

Из рис. 3, а видно, что для залежей с ППД отклонения ΔKIN по статистическим моделям более $\pm 0,06$ д.е. установлены для 17,7 % (8 из 45). Максимальное отклонение $\Delta KIN = 0,101$ д.е. с завышением прогнозной оценки наблюдается для залежи Б62-Мл Чернушинского месторождения (0,473 против 0,372 д.е.). Для данного объекта с вязкостью нефти $\mu = 19,6$ мПа·с при выработке запасов $\eta = 59$ % характерна низкая текущая обводненность скважин $w = 57$ %. Сопоставляя эти данные с усредненными для Пермского края зависимостями $w = f(\eta)$ из работы [40], можно сделать вывод, что для визейских объектов с $\mu = 20$ мПа·с обводненность $w = 57$ % соответствует значительно более низкой выработке запасов $\eta = 38$ %. В данном случае можно сделать вывод, что НИЗ и проектный КИН занижены, а прогнозная оценка по статистической модели более достоверно оценивает КИН в сравнение с утвержденным в ПТД значением.

Известной характерной особенностью применения статистических методов являются погрешности при адаптации прогнозной моделью аномально низких и высоких фактических значений. Для статистической модели, построенной для залежей с ППД, максимальные занижения КИН в сравнении с проектными значениями установлены для двух объектов с высокими $KIN > 0,6$ д.е., которые нетипичны для анализируемой статистической выборки (рис. 3, а).

Как было показано выше, для залежей, разрабатываемых на естественном режиме, статистические модели менее устойчивы, что связано со значительно меньшей долей в выборке объектов поздних стадий разработки. Отклонения ΔKIN по статистическим моделям менее 0,06 д.е. установлены для 70,3 % (19 из 27), при этом большая доля (25,9 %) попала в диа-

пазон ΔKIN от 0,06 до 0,09 д.е. (рис. 3, б). Максимальное отклонение $\Delta KIN = -0,092$ с занижением статистической оценки установлено для залежи Бб Русаковского месторождения, где утвержден аномально высокий $KIN = 0,603$. Значительные занижения установлены также еще для двух объектов с $KIN > 0,59$ д.е. Столь высокие КИН для визейских объектов, разрабатываемых на естественном режиме, в целом нетипичны.

Завышение по статистическим моделям $\Delta KIN > 0,06$ д.е. (рис. 3, б) во всех трех случаях наблюдается для месторождений, разработка ПТД которых проводилась более 10 лет назад, при этом были утверждены пониженные КИН (от 0,273 до 0,382 д.е.). Для данных объектов с учетом современного уровня развития эффективных ГТМ может быть рекомендован пересмотр проектных решений с возможным пересмотром КИН в сторону их увеличения.

Заключение

Таким образом, для визейских нефтяных эксплуатационных объектов Пермского края проведен анализ динамики изменения геолого-технологических показателей разработки. В последнее десятилетие установлен как количественный, так и качественный рост эффективности геолого-технических мероприятий, что привело к значительному увеличению утвержденных проектных коэффициентов извлечения нефти на 2021 г. Установлено, что используемые в настоящее время при выполнении геолого-экономической оценки запасов статистические модели, построенные в 2008 г., системно занижают коэффициенты извлечения нефти. С учетом этого на основе актуализации статистической информации постро-

ены новые аналого-статистические модели для расчета коэффициентов извлечения нефти. Сходимость полученных моделей показала удовлетворительные результаты для объектов поздних стадий, разрабатываемых как с поддержанием пластового давления, так и на естественном режиме. Полученные статистические модели оценки коэффициентов извлечения нефти могут быть использованы для оперативного контроля

извлекаемых запасов нефти при проектировании разработки и проведении геолого-экономической оценки запасов по международным стандартам.

Исследование выполнено в рамках гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки ведущих научных школ Российской Федерации (номер гранта НШ-1010.2022.1.5).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Petroleum Resources Management System // Sponsored by: Society of Petroleum Engineers (SPE), World Petroleum Council (WPC), American Association of Petroleum Geologists (AAPG), Society of Petroleum Evaluation Engineers (SPEE), Society of Exploration Geophysicists (SEG), Society of Petrophysicists and Well Log Analysts (SPWLA), European Association of Geoscientists & Engineers (EAGE); Publ. revised June 2018.
2. Wang H. Application of improved water flooding curve in recoverable reserves // Petroleum Geology and Recovery Efficiency. – 2012. – V. 19. – № 4. – P. 84–86.
3. Sun Hongxia. New understanding of upward water flooding characteristic curve in high water-cut stage // Special Oil and Gas Reservoirs. – 2016. – V. 23. – № 1. – P. 92–95.
4. Zhou Z., Wang J. Research and application of a new type of water flooding characteristic curve in oilfield development // Advances in Petroleum Exploration and Development. – 2016. – V. 11. – № 2. – P. 1–5.
5. Горовов В.И., Распопов А.В., Шустеф И.Н. Приближенный метод расчета показателей разработки месторождений // Нефтяное хозяйство. – 1988. – № 6. – С. 25–27.
6. Коэффициент извлечения нефти: расчет и реальность / Т.Б. Поплаухина, И.В. Якимова, Т.Н. Матвейкина, А.И. Савич // Геология, геофизика и разработка нефтяных месторождений. – 2005. – № 5–6. – С. 16–20.
7. Кошкин К.А., Галкин С.В. Возможности прогноза нефтеизвлечения при переоценке запасов визейских терригенных залежей северо-востока Волго-Уральской нефтегазоносной провинции // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2015. – № 17. – С. 16–23.
8. Лаверов Н.П. Топливо-энергетические ресурсы // Вестник РАН. – 2006. – Т. 76. – № 5. – С. 398–408.
9. Хавкин А.Я. Инновации в МУН – основа VI техноклада // Вестник ЦКР Роснедра. – 2013. – Т. 2. – С. 52–55.
10. Дияшев Р.Н. Тенденции применения МУН в мире // Георесурсы. – 2008. – № 4. – С. 42–46.
11. Selectivity of pore-scale elastic microspheres as a novel profile control and oil displacement agent / C. Yao, G. Lei, L. Li, X. Gao // Energy Fuels. – 2012. – V. 26. – P. 5092–5101.
12. Conformance control mechanism of low elastic polymer microspheres in porous medium / H. Yang, B. Zhou, T. Zhu, P. Wang, X. Zhang, T. Wang, F. Wu, L. Zhang, W. Kang, Y. Ketova, S. Galkin // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2021. – V. 196. – № 107708. DOI: 10.1016/j.petrol.2020.107708.
13. Bai B., Wei M., Liu Y. Volumes of preformed particle gel for water conformance control // Oil & gas science and technology. – 2012. – V. 67. – № 6. – P. 941–952.
14. Газизов А.А. Увеличение нефтеотдачи неоднородных пластов на поздней стадии разработки. – М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2002. – 639 с.
15. Рузин Л.М., Морозюк Л.М. Методы повышения нефтеотдачи пластов (теория и практика). – Ухта: УГТУ, 2014. – 127 с.
16. Keshthkar S., Sabeti M., Mohammadi A.H. Numerical approach for enhanced oil recovery with surfactant flooding // Petroleum. – 2016. – V. 2. – № 1. – P. 98–107. DOI: 10.1016/J.PETLM.2015.11.002.
17. Бондаренко А.В., Кудряшова Д.А. Применение гидродинамического моделирования для оценки прогнозной эффективности технологии полимерного заводнения на Москудыинском месторождении // Нефтяное хозяйство. – 2015. – № 10. – С. 102–105.
18. Перспективы применения полимерного заводнения на месторождениях Пермского региона / Н.А. Лядова, А.В. Распопов, А.В. Бондаренко, А.И. Ковалевский, С.С. Черепанов, Т.Р. Балдина // Нефтяное хозяйство. – 2016. – № 6. – С. 94–96.
19. Ketova Y.A., Galkin S.V., Kolychev I.J. Evaluation and X-Ray tomography analysis of super-absorbent polymer for water management in high salinity mature reservoirs // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2021. – V. 196. – № 107998. DOI: 10.1016/j.petrol.2020.107998.
20. Изучение механизма перераспределения фильтрационных потоков при закачке синтезированных спитых гелей методом рентгеновской томографии ядра / С.В. Галкин, Ю.А. Кетова, Я.В. Савицкий, Канг Ванли, Бауыржан Сарсенбекулы // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 11. – С. 127–136. DOI: 10.18799/24131830/2020/11/2892.
21. Ugursal A., Zhu D., Hill A.D. Development of acid fracturing model for naturally fractured reservoirs // SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference and Exhibition. – The Woodlands, Texas, USA, January 2018. DOI: 10.2118/189834-MS.
22. Comparative study of acid fracturing and propped hydraulic fracturing for a tight carbonate formation / A. Suleimenova, X. Wang, D. Zhu, A.D. Hill // SPE Europeac featured at 78th EAGE Conference and Exhibition. – Vienna, Austria, 30 May – 2 June 2016. DOI: 10.2118/180114-MS.
23. Laboratory measurement of hydraulic-fracture conductivities in the Barnett Shale / J. Zhang, A. Kamenov, D. Zhu, A.D. Hill // SPE Prod & Oper. – 2014. – V. 29. – № 3. – P. 216–227. DOI: 10.2118/163839-PA.
24. Performance of multiple fractured horizontal wells with consideration of pressure drop within wellbore / Z. Chen, X. Liao, X. Zhao, L. Zhu, H. Liu // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2016. – V. 146. – P. 677–693.
25. Бархатов Э.А., Яркиева Н.Р. Эффективность применения многозонного гидроразрыва пласта в горизонтальных скважинах // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2017. – Т. 328. – № 10. – С. 50–58.
26. Шакин М.Ш. Проблемы и пути решения проведения ГРП в многопластовых залежах со сплошной перфорацией целевого горизонта // SOCAR Proceedings. – 2020. – № 3. – P. 66–73.
27. Развитие технологий гидравлического разрыва пласта на месторождениях Пермского края / В.Л. Воеводкин, А.А. Алероев, Т.Р. Балдина, А.В. Распопов, А.С. Казанцев, С.А. Кондратьев // Нефтяное хозяйство. – 2018. – № 11. – С. 108–113.
28. Опыт выполнения гидроразрыва пласта на месторождениях Пермского края, Республики Коми и Ненецкого автономного округа / А.В. Распопов, С.А. Кондратьев, Р.Р. Шарафеев, Д.В. Новокрещенных, С.А. Дроздов // Нефтяное хозяйство. – 2019. – № 8. – С. 48–51.
29. Elliott S. Coiled-tubing method drills radial laterals to improve oil production from a depleted reservoir // World Oil. – 2011. – V. 232. – № 10. – P. 57–64.
30. Kohar J.P., Gogoi S. Radial drilling technique for improving recovery from existing oil fields // International journal of scientific & technology research. – 2014. – V. 3. – Iss. 11. – P. 159–161.
31. Кочнев А.А., Зотиков В.И., Галкин С.В. Анализ влияния геолого-технологических показателей на эффективность технологии радиального бурения на примере эксплуатационных объектов Пермского края // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2018. – Т. 329. – № 12. – С. 20–29.
32. Воеводкин В.Л., Окроемелидзе Г.В. Развитие технологии строительства боковых стволов на месторождениях Пермского края // Нефтяное хозяйство. – 2019. – № 8. – С. 32–35.

33. Комплексный подход к планированию боковых стволов / А.В. Распопов, А.С. Казанцев, Д.В. Леонтьев, С.В. Летунова // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2015. – № 12. – С. 52–55.
34. Определение объемного коэффициента сетки скважин для оценки конечного коэффициента нефтеизвлечения при разработке залежей нефти горизонтальными скважинами / И.Н. Хакимзянов, В.Ш. Мухаметшин, Р.Н. Бахтизин, Р.И. Шешдиров // SOCAR Proceedings. – 2021. – № 2. – Р. 047–053.
35. Назипова А.А. Увеличение нефтеотдачи путем оптимизации длины горизонтальных боковых стволов для месторождений поздней стадии разработки // Сборник трудов конференции. – Альметьевск: Институт геологии и нефтегазовых технологий, 2019. – С. 87–91.
36. Зомарева Е.В., Стрекалов А.В. Сравнение дебитов вертикальной, горизонтальной и многоствольной скважины различными методами // Научно-практический электронный журнал «Аллея Науки». – 2019. – Т. 31. – № 4. – С. 240–245.
37. Зайцев Р.А., Распопов А.В. Опыт разработки месторождений Пермского края горизонтальными скважинами // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2020. – Т. 20. – № 2. – С. 182–191. DOI: 10.15593/2224-9923/2020.2.8.
38. Lecampion B., Desroches J. Simultaneous initiation and growth of multiple radial hydraulic fractures from a horizontal wellbore // Journal of the Mechanics and Physics of Solids. – 2015. – V. 82. – P. 235–258.
39. Хакимзянов И.Н., Хисамов Р.С., Ибатуллин Р.Р. Наука и практика применения разветвленных и многозбойных скважин при разработке нефтяных месторождений. – Казань: ФЭН, 2011. – 319 с.
40. Илюшин П.Ю. Обоснование прогноза обводненности залежей нефти с использованием аналого-статистических методов (на примере разработки месторождений Пермского Прикамья): автореф. дис. ... канд. техн. наук. – СПб, 2013. – 20 с.

Поступила 20.04.2022 г.

Информация об авторах

Галкин С.В., доктор геолого-минералогических наук, профессор, декан горно-нефтяного факультета Пермского национального исследовательского политехнического университета.

Лобанов Д.С., ведущий инженер отдела геолого-экономической оценки запасов месторождений, Филиал ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг» «ПермНИПИнефть» в г. Перми.

UDC 622.276

USE OF MULTIDIMENSIONAL STATISTICAL MODELS FOR OPERATIONAL CONTROL OF RECOVERABLE RESERVES FOR THE VISEAN DEPOSITS OF THE PERM REGION

Sergey V. Galkin¹,
doc_galkin@mail.ru

Dmitriy S. Lobanov²,
Dmitrij.Lobanov@pnn.lukoil.com

¹ Perm National Research Polytechnic University,
29, Komsomolskiy avenue, Perm, 614990, Russia.

² Branch of OOO «LUKOIL-Engineering» «PermNIPneft» in Perm,
3a, Permskaya street, Perm, 614015, Russia.

The relevance. As part of the annual geological and economic assessment of reserves in accordance with international standards, it is recommended to use analogy methods, including multidimensional statistical methods, when assessing oil recovery factors. The currently used statistical models for the deposits of the Perm region are based on the analysis of information as of 2008. Over the past decade, for the study area, there has been a massive introduction of fundamentally new reservoir development technologies, which significantly increased the development efficiency and the attainable values of the design oil recovery factors. Accordingly, in modern conditions, it is necessary to clarify the operating models for predicting oil recovery factors.

The purpose of the research is updating multidimensional models for predicting oil recovery factors for the Visean oil production objects of the Perm region, taking into account modern oil field development experience.

Objects: the clastic Visean oil production objects of the Perm region.

Methodology. The analysis of geological and technological indicators of development was carried out, their influence on the approved values of oil recovery factor was assessed according to the current project technological documents. The method based on the Student's *t*-distribution, correlation analysis and multiple regression method were used as statistical ones. The analysis was carried out separately for oil deposits developed under the conditions of the reservoir pressure maintenance system and in the natural depletion mode. The results of the statistical assessment of oil recovery factors for deposits at late stages of development are compared with those approved in the project technological documents.

Results. The obtained multidimensional statistical models make it possible to promptly predict oil recovery factors for deposits developed with reservoir pressure maintenance and in natural depletion mode. Forecasting models were built in two versions: based on geological and physical indicators for fields at the exploration stage (category C1+C2 reserves) and geological and technological indicators for developed fields (category A+B reserves). The convergence of the obtained models showed satisfactory results for objects at late stages. The obtained models can be used for operational control of recoverable oil reserves when designing oil field development and conducting geological and economic assessment of reserves according to international standards.

Key words:

Analog-statistical models, recoverable reserves, oil production objects, stages of development, oil recovery factor, geological and technical activities.

The research was carried out within the framework of a grant from the President of the Russian Federation for state support of leading scientific schools of the Russian Federation (grant number NS-1010.2022.1.5).

REFERENCES

1. *Petroleum Resources Management System*. Sponsored by: Society of Petroleum Engineers (SPE), World Petroleum Council (WPC), American Association of Petroleum Geologists (AAPG), Society of Petroleum Evaluation Engineers (SPEE), Society of Exploration Geophysicists (SEG), Society of Petrophysicists and Well Log Analysts (SPWLA), European Association of Geoscientists & Engineers (EAGE); Publ. revised June 2018.
2. Wang H. Application of improved water flooding curve in recoverable reserves. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2012, vol. 19, no. 4, pp. 84–86.
3. Sun Hongxia. New understanding of upward water flooding characteristic curve in high water-cut stage. *Special Oil and Gas Reservoirs*, 2016, vol. 23, no. 1, pp. 92–95.
4. Zhou Z., Wang J. Research and application of a new type of water flooding characteristic curve in oilfield development. *Advances in Petroleum Exploration and Development*, 2016, vol. 11, no. 2, pp. 1–5.
5. Gorovov V.I., Raspopov A.V., Shustef I.N. Priblizhenny metod rascheta pokazateley razrabotki mestorozhdeniy [Approximate method for calculating field development indicators]. *Oil industry*, 1988, no. 6, pp. 25–27.
6. Poplauhina T.B., Yakimova I.V., Matveikina T.N., Savich A.I. Koeffitsient izvlecheniya nefi: raschet i realnost [Oil recovery ratio: calculation and reality]. *Geology, Geophysics and Development of Oil and Gas Fields*, 2005, no. 5–6, pp. 16–20.
7. Koshkin K.A., Galkin S.V. Oil recovery forecast during reevaluation of Visean clastic deposits reserves of north-east Volga-Ural oil and gas province. *Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering*, 2015, no. 17, pp. 16–23. In Rus. DOI: 10.15593/2224-9923/2015.17.2.
8. Laverov N.P. Toplivno-energeticheskie resursy [Fuel and energy resources]. *Vestnik RAN*, 2006, vol. 76, no. 5, pp. 398–408.
9. Khavkin A.Ya. Innovations in EOR – the basis of the VI techno-structure. *Vestnik TsKR Rosnedra*, 2013, vol. 2, pp. 52–55. In Rus.
10. Diyashev R.N. Tendentsii primeneniya MUN v mire [Trends in the use of EOR in the world]. *Georesursy*, 2008, no. 4, pp. 42–46.
11. Yao C., Lei G., Li L., Gao X. Selectivity of pore-scale elastic microspheres as a novel profile control and oil displacement agent. *Energy Fuels*, 2012, vol. 26, pp. 5092–5101.
12. Yang H., Zhou B., Zhu T., Wang P., Zhang X., Wang T., Wu F., Zhang L., Kang W., Ketova Y., Galkin S. Conformance control mechanism of low elastic polymer microspheres in porous medium. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2021, vol. 196, no. 107708. DOI: 10.1016/j.petrol.2020.107708.

13. Bai B., Wei M., Liu Y. Volumes of preformed particle gel for water conformance control. *Oil & gas science and technology*, 2012, vol. 67, no. 6, pp. 941–952.
14. Gazizov A.A. *Uvelichenie nefteotdachi neodnorodnykh plastov na pozdney stadii razrabotki* [Enhanced oil recovery of heterogeneous reservoirs at a late stage of development]. Moscow, LLC «Nedra-Businesscenter» Publ., 2002. 639 p.
15. Ruzin L.M., Morozuk L.M. *Metody povysheniya nefteotdachi plastov (teoriya i praktika)* [The enhanced oil recovery methods (theory and practice)]. Ukhta, USTU Publ., 2014. 127 p.
16. Keshtkar S., Sabeti M., Mohammadi A.H. Numerical approach for enhanced oil recovery with surfactant flooding. *Petroleum*, 2016, vol. 2, no. 1, pp. 98–107. DOI: 10.1016/J.PETLM.2015.11.002.
17. Bondarenko A.V., Kudryashova D.A. The application of hydrodynamic modeling for predictive effectiveness assessment of polymer flooding technology on Moskundinskoe field. *Oil industry*, 2015, no. 10, pp. 102–105. In Rus.
18. Lyadova N.A., Raspopov A.V., Bondarenko A.V., Kovalevskiy A.I., Cherepanov S.S., Baldina T.R. Perspective application of the polymer flooding technology in the Perm region oil deposits. *Oil industry*, 2016, no. 6, pp. 94–96. In Rus.
19. Ketova Y.A., Galkin S.V., Kolychev I.J. Evaluation and X-Ray tomography analysis of super-absorbent polymer for water management in high salinity mature reservoirs. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2021, vol. 196, no. 107998. DOI: 10.1016/j.petrol.2020.107998.
20. Galkin S.V., Ketova Yu.A., Savitskiy Ya.V., Kang Wanli, Bauyrzhan Sarsenbekuly. X-ray analysis of conformance control technology based on preformed particle gel treatment. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 11, pp. 127–136. In Rus. DOI: 10.18799/24131830/2020/11/2892.
21. Ugursal A., Zhu D., Hill A.D. Development of acid fracturing model for naturally fractured reservoirs. *SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference and Exhibition*. The Woodlands, Texas, USA, January 2018. DOI: 10.2118/189834-MS.
22. Suleimenova A., Wang X., Zhu D., Hill A.D. Comparative study of acid fracturing and propped hydraulic fracturing for a tight carbonate formation. *SPE Europec featured at 78th EAGE Conference and Exhibition*. Vienna, Austria, 30 May – 2 June 2016. DOI: 10.2118/180114-MS.
23. Zhang J., Kamenov A., Zhu D., Hill A.D. Laboratory measurement of hydraulic-fracture conductivities in the Barnett Shale. *SPE Prod & Oper.*, 2014, vol. 29, no. 3, pp. 216–227. DOI: 10.2118/163839-PA.
24. Chen Z., Liao X., Zhao X., Zhu L., Liu H. Performance of multiple fractured horizontal wells with consideration of pressure drop within wellbore. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2016, vol. 146, pp. 677–693.
25. Barkhatov E.A., Yarkeeva N.R. The efficiency of multizone hydraulic fracturing in horizontal well. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 10, pp. 50–58. In Rus.
26. Shaken M.Sh. Problems and methods of hydraulic fracturing in multilayered oil reservoirs with the continuous perforations. *SOCAR Proceedings*, 2020, no. 3, pp. 66–73.
27. Voevodkin V.L., Aleroev A.A., Baldina T.R., Raspopov A.V., Kazantsev A.S., Kondratiev S.A. The evolution of the hydraulic fracturing technology on the fields of Perm region. *Oil industry*, 2018, no. 11, pp. 108–113. In Rus.
28. Raspopov A.V., Kondratiev S.A., Sharafiev R.R., Novokreschenykh D.V., Drozdov S.A. Experience of hydraulic fracturing in oil fields of the Perm region, the Komi Republic and the Nenets autonomous district. *Oil industry*, 2019, no. 8, pp. 48–51. In Rus.
29. Elliott S. Coiled-tubing method drills radial laterals to improve oil production from a depleted reservoir. *World Oil*, 2011, vol. 232, no. 10, pp. 57–64.
30. Kohar J.P., Gogoi S. Radial drilling technique for improving recovery from existing oil fields. *International journal of scientific & technology research*, 2014, vol. 3, Iss. 11, pp. 159–161.
31. Kochnev A.A., Zotikov V.I., Galkin S.V. Analysis of the influence of geological technological parameters on the effectiveness of radial drilling technology on the example of operational objects in Perm region. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 12, pp. 20–29. In Rus.
32. Voevodkin V.L., Okromelidze G.V. The development of the sidetracks construction technology at oil fields in Perm region. *Oil industry*, 2019, no. 8, pp. 32–35. In Rus.
33. Raspopov A.V., Kazantsev A.S., Leontiev D.V., Letunova S.V. An integrated approach to planning sidetracks. *Geology, Geophysics and Development of Oil and Gas Fields*, 2015, no. 12, pp. 52–55. In Rus.
34. Khakimzyanov I.N., Mukhametshin V.Sh., Bakhtizin R.N., Sheshdirov R.I. Determination of well spacing volumetric factor for assessment of final oil recovery in reservoirs developed by horizontal wells. *SOCAR Proceedings*, 2021, no. 2, pp. 047–053. In Rus.
35. Nazipova A.A. Uvelichenie nefteotdachi putem optimizatsii dliny gorizontalnykh bokovykh stvolov dlya mestorozhdeniy pozdney stadii razrabotki [Increased oil recovery by optimizing the length of horizontal sidetracks for late-stage fields]. *Sbornikov trudov konferentsii* [Collection of conference proceedings]. Almet'yevsk, Institute of geology oil and gas technologies Publ., 2019. pp. 87–89.
36. Zomareva E.V., Strekalov A.V. Comparison of flow rates of vertical, horizontal and multilateral wells by different methods. *Scientific and practical electronic journal Alley Nauki*, 2019, vol. 31, no. 4, pp. 240–245. In Rus.
37. Zaitsev R.A., Raspopov A.V. A practice of development of Perm Krai fields with horizontal wells. *Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering*, 2020, vol. 20, no. 2, pp. 182–191. In Rus. DOI: 10.15593/2224-9923/2020.2.8.
38. Lecampion B., Desroches J. Simultaneous initiation and growth of multiple radial hydraulic fractures from a horizontal wellbore. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2015, vol. 82, pp. 235–258.
39. Khakimzyanov I.N., Khisamov R.S., Ibatullin R.R. *Nauka i praktika primeneniya razvetvlenykh i mnogozaboynykh skvazhin pri razrabotke neftyanykh mestorozhdeniy* [Science and practice of application branched and multilateral wells in the development of oil fields]. Kazan, FEN Publ., 2011. 319 p.
40. Ilyushin P.Yu. *Obosnovanie prognoza obvodnennosti zalezhey nefii s ispolzovaniem analogo-statisticheskikh metodov (na primere razrabotki mestorozhdeniy Permskogo Prikamya)*. Avtoreferat Dis. Kand. nauk [Justification of the forecast of water-cut of oil deposits using analog-statistical methods (on the example of the development of deposits in the Perm Kama region). Cand. Diss. Abstract]. St. Petersburg, 2013. 20 p.

Received: 20 April 2022.

Information about the authors

Sergey V. Galkin, Dr. Sc., professor, dean of the Mining and Oil Faculty, Perm National Research Polytechnic University.
Dmitriy S. Lobanov, leading engineer, branch of OOO «LUKOIL-Engineering» «PermNIPIneft» in Perm.

УДК 553.495:622.277 (470.58)

САМООЧИЩЕНИЕ ПРОДУКТИВНОГО ГОРИЗОНТА НА МЕСТЕ ПРОВЕДЕНИЯ ДВУХСКВАЖИННОГО ОПЫТА ПО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЮ УРАНА НА ДОБРОВОЛЬНОМ МЕСТОРОЖДЕНИИ (КУРГАНСКАЯ ОБЛАСТЬ)

Сащенко Анна Владимировна¹,
sashchenko@vims-geo.ru

Авдонин Геннадий Иванович¹,
gosha1956@mail.ru

Тарханова Галина Александровна¹,
sashchenko@vims-geo.ru

Носков Михаил Дмитриевич²,
MDNoskov@mephi.ru

¹ Всероссийский научно-исследовательский институт минерального сырья им. Н.М. Федоровского, Россия, 119017, г. Москва, Старомонетный переулок, 31.

² Северский Технологический Институт Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», Россия, 636036, г. Северск, пр. Коммунистический, 65.

Актуальность темы обусловлена необходимостью определения природы повышенных содержаний урана в породах на месте проведения опыта двухскважинного подземного выщелачивания и мониторинга качества подземных вод для выявления их потенциальной возможности к самовосстановлению природного равновесия и условий самоочищения рудовмещающего горизонта без проведения специальной рекультивации.

Цель: определение нейтрализующих свойств рудовмещающих пород по отношению к техногенным компонентам, поступающим в недра при проведении скважинного подземного выщелачивания; изучение изменения концентраций загрязняющих компонентов в пластовых водах и минерального состава рудовмещающих пород на месте проведения опыта двухскважинного подземного выщелачивания.

Объект: рудовмещающие отложения и пластовые воды таборинской свиты ($J_{2-3(b)}$) средне-позднеюрского возраста, изученные на месте проведения натурного двухскважинного опыта (контрольная скважина 224) на Добровольном месторождении.

Методы. Состав пластовых вод изучен непосредственно на месте бурения контрольной скважины; минералогическое изучение пород и руд выполнено с применением комплекса методов, в том числе и прецизионных, в лабораториях Федерального государственного бюджетного учреждения «Всероссийский научно-исследовательский институт минерального сырья им. Н.М. Федоровского»: исследования проведены на рентгеновском микроанализаторе (РСМА) JEOL JXA 8100, укомплектованном энергодисперсионной приставкой INCA, на растровом электронном микроскопе наиболее представительного образца с целью изучения химического состава, морфологии и детального характера распределения урановой минерализации. Радиоизотопные исследования осуществлены гамма-спектрометрическим методом с использованием «ORTEC-65195-P/DSPecPlus» по методике, разработанной Всероссийским научно-исследовательским институтом минерального сырья им. Н.М. Федоровского. С целью изучения влияния жизнедеятельности микроорганизмов на физико-химические свойства среды в Институте микробиологии им. С.Н. Виноградского РАН выполнены микробиологические исследования.

Результаты. Выявлены остаточные после проведения двухскважинного опыта концентрации урана; определены участки перетопления урана. Установлено, что через 30 лет после проведения опыта пластовые воды на Добровольном месторождении восстановились практически до исходного состояния. Подтверждена безопасность добычи урана методом скважинного подземного выщелачивания на Добровольном месторождении.

Ключевые слова:

Скважинное подземное выщелачивание, уран, Добровольное месторождение, перетопление, нейтрализующие свойства, геологоразведка.

Введение

Добровольное месторождение урана расположено в Звериногородском районе Курганской области на границе с Казахстаном. В тектоническом отношении месторождение приурочено к Восточному склону Уральского хребта в пределах Тюменско-Кустанайского прогиба, в зоне сочленения с Западно-Сибирской плитой [1]. Месторождение размещается в Убоганской палеодолине средне-позднеюрского возраста, имеющей запад-северо-западное простирание и врезанной в палеозойский фундамент [2]. Непосред-

ственно на месторождении породы фундамента представлены дацитами, андезитами, алевролитами, туфопесчаниками, аргиллитами и другими породами с фоновым кларковым содержанием урана. Месторождение относится к базальному подтипу песчаниковых месторождений, которые обрабатываются методом скважинного подземного выщелачивания (СПВ) [3, 4].

Урановое оруденение локализовано на глубинах 420–515 м в проницаемых сероцветных отложениях таборинской свиты средне-позднеюрского возраста ($J_{2-3(b)}$) и приурочено к области выклинивания окисленных пород [5]. Рудовмещающий водоносный го-

ризонт перекрыт красноцветными глинами коскольской свиты (K_{ks}), которые служат верхним водоупором. Нижним водоупором являются либо глинистые прослои таборинской свиты, либо породы фундамента. Таким образом, водоносный горизонт изолирован от выше- и нижележащих горизонтов, характеризуется застойным режимом, высокой минерализацией вод и не пригоден для питьевого водоснабжения [6].

В период предварительной разведки в 1989 г. в центральной части месторождения был проведен двухскважинный опыт выщелачивания по методике В.А. Грабовникова [7]. Длительность опыта составила 260 дней. Натурный опыт показал принципиальную возможность добычи урана на месторождении методом СПВ по сернокислотной схеме. В последующие 30 лет геологоразведочные работы не велись. В 2020 г. АО «Далур» при детальной разведке месторождения была пробурена контрольная скважина Р-224 с целью изучения состояния рудовмещающих пород и пластовых вод на месте ранее проведенного двухскважинного опыта, а также разведочные скважины Р-118, Р-121, Р-201.

Рудная залежь на месте проведения опыта характеризуется средними для месторождения параметрами. Рудовмещающий горизонт представлен сероцветными слабосцементированными глинистыми песками, обогащенными углистым растительным детритом и сульфидами железа, которые являются восстановите-

лями урана [8]. Содержание урана в среднем по месторождению составляет 0,028...0,057 % [2], достигая максимума 7,66 %, что характерно для проб, обогащенных углистыми обломками. Содержание органического углерода колеблется от 0,2 до 6 %. Отложения имеют преимущественно полевошпат-кварцевый состав. Глинистый цемент гидрослюдисто-каолинитовый, где количество каолинита колеблется от 50 до 60 %, гидрослюды – 12–27 %, хлорита – 5 %.

Рудовмещающие породы обогащены углистым растительным детритом, как рассеянным в цементе, так и присутствующим в виде крупных обломков. Сульфиды железа в основном представлены пиритом различной морфологии. Наиболее мелкая разновидность представлена фрамбоидами, образованными, вероятно, на месте деятельности сульфатредуцирующих бактерий [9]. Более крупная вкрапленность в виде агрегатов кристаллов формирует стяжения и конкреции.

Руды месторождения имеют пятнистую, вкрапленную и вуалевую текстуры, которые наиболее отчетливо проявляются на радиографиях с экспозицией в 15 суток. Урановая минерализация Зауральских месторождений представлена оксидом урана (настураном) различной морфологии с существенно подчиненным количеством коффинита [10]. Авторами при изучении исходных пород установлены три разновидности оксида урана (рис. 1, табл. 1).

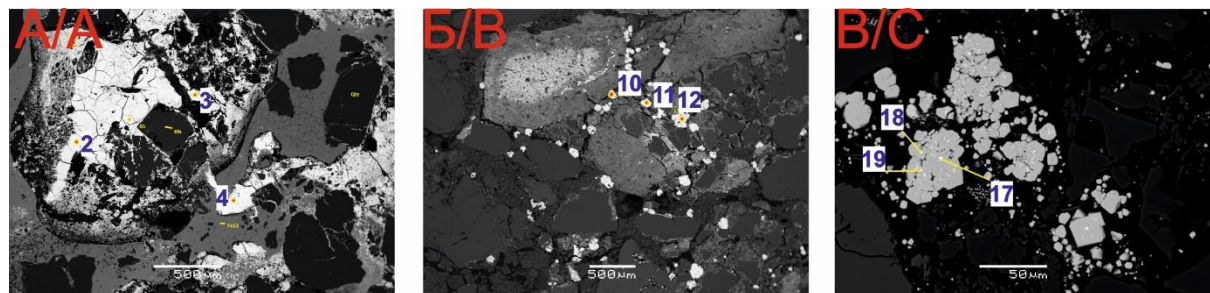


Рис. 1. Разновидности урановой минерализации в исходных рудах Добровольного месторождения (изображения в обратно-рассеянных электронах): А) плотные выделения оксида урана первой разновидности (белое); Б) оксид урана второй разновидности (белая вкрапленность); В) оксид урана третьей разновидности (в кристаллах пирита)

Fig. 1. Varieties of uranium mineralization in the source ores of the Dobrovolnoe deposit (images in back scattering electrons): А) dense separations of uranium oxide of the first variety (white); В) uranium oxide of the second variety (white impregnations); С) uranium oxide of the third variety (in pyrite crystals)

Таблица 1. Результаты микрозондовых анализов оксида урана первой разновидности (спектры 2–4), второй разновидности (спектры 10–12) и третьей разновидности (спектры 17–19) (к рис. 1)

Table 1. Results of microprobe analyses of uranium oxide of the first variety (spectra 2–4), the second variety (spectra 10–12) and the third variety (spectra 17–19) (to Fig. 1)

№ спектра Spectrum no.	Содержание элементов (мас. %)/Contents of the elements (wt. %)											
	O	Si	P	S	Cl	Ca	Ti	V	Fe	Mn	U	Сумма Total
2	21,91	0,5	0,89	0,36	0,06	2,97	0,48	0,3	–	0,29	68,67	96,63
3	21,31	0,51	0,83	0,17	0,21	2,79	0,41	0,22	–	0,19	69,73	96,54
4	21,12	0,62	0,86	0,63	0,31	1,07	0,5	0,3	0,4	–	71,85	97,64
10	26,17	0,17	0,11	4,23	–	–	–	–	0,17	–	65,4	96,71
11	26,28	0,25	–	4,31	–	–	–	–	0,27	–	64,89	96,7
12	23,16	0,22	0,06	3,89	–	–	0,09	–	–	–	61,84	90
17	8,85	0,33	0,16	28,03	0,08	0,9	0,87	–	25,17	–	28,35	93,16
18	10,12	0,44	0,11	32,67	–	0,64	1,17	–	28,44	–	22,91	98,67
19	5,36	0,34	0,13	32,74	–	0,85	0,77	–	28,42	–	25,64	94,24

Первая разновидность оксида урана представлена плотными выделениями среди терригенных зерен и пирита, развивающегося в цементе песчаника (рис. 1, А; табл. 1, спектры 2–4). Для нее характерны трещины усыхания и высокая отражательная способность. В минерале постоянно определяются Si, P, S, Cl, Ca, Ti, V и (не повсеместно) Fe и Mn. Присутствие кремния позволяет допускать примесь коффинита в изученных обособлениях.

Вторая разновидность оксида урана встречается наиболее часто и распространена наиболее широко. Как правило, это близкие к округлым обособления с наблюдаемым иногда радиально-лучистым строением (рис. 1, Б; табл. 1, спектры 10–12). Выявленное совместное нахождение двух разновидностей оксида урана, предположительно, свидетельствует о одновременности их образования. Размеры вкраплений данной разновидности микронные, редко выявляются более крупные, в которых возможно определение состава минерала. Оксид урана второй разновидности формирует вкрапленность в цементе песчаника по краям обломочных зерен, кристаллов и зерен пирита, редко по трещинам проникает в зерна кварца и пирита. Определение химического состава двух разновидностей оксида урана показывает их различие в элементах-примесях: вторая разновидность несколько более «чистая» от примесей, чем первая. Исключение составляет наличие значительного количества серы, вероятно, биогенной природы.

Третья разновидность оксида урана представлена выделениями, имеющими микронные размеры, выявлена внутри крупных, хорошо оговоренных кристаллов и крупных плотных агрегативных скоплений кристаллов пирита (рис. 1, В; табл. 1, спектры 17–19). В последнем случае кристаллографические границы агрегата слабо выражены, и их выделения имеют облик конкреций. Совместно с ураном устанавливаются в повышенных содержаниях титан, то-

рий, кальций, цирконий и иттрий. Интересно отметить, что вкрапленность оксида урана всегда приурочена к центральным частям пиритовых выделений.

При проведении лабораторных опытов по выщелачиванию урана в рудах по скважинам Р-118, Р-121 и Р-201 установлено, что остаточные содержания урана преимущественно не превышают 0,00n %, что характеризует руды как легковыщелачиваемые. Содержание остаточной минерализации урана более тысячных процентов фиксируется в единичных пробах, которые соответствуют богатым рудам с первоначальным содержанием урана более 1 %. Из скважины Р-118 был изучен кек выщелачивания с остаточным содержанием урана 0,118 %, при исходных содержаниях – 4,216 %, что является практически максимальным для изучаемых руд. Минералогически данная проба наиболее богата органическими остатками и обилием различных по размерам и морфологии дисульфидов железа. Основным минералом, обнаруженным в кекках выщелачивания, является оксид урана, заключенный внутри крупных обособлений пирита. На рис. 2 представлены выделения пирита с остаточной урановой минерализацией и с различной степенью воздействия на нее сернокислых растворов: А) слабое, оксиды урана сохранились в кристаллах пирита; Б) заметное, оксиды урана в разъеденной конкреции сульфидов; В) реликты сульфидной минерализации, не содержащие урана.

Нахождение урановой минерализации во внутренних частях крупных дисульфидных образований требует полного их разложения для высвобождения урана. Приведенные наблюдения позволяют сделать вывод о том, что крупные обособления пирита, содержащие включения урановой минерализации, не вскрываются при лабораторных испытаниях, что может создавать сложность в процессе выщелачивания урана.

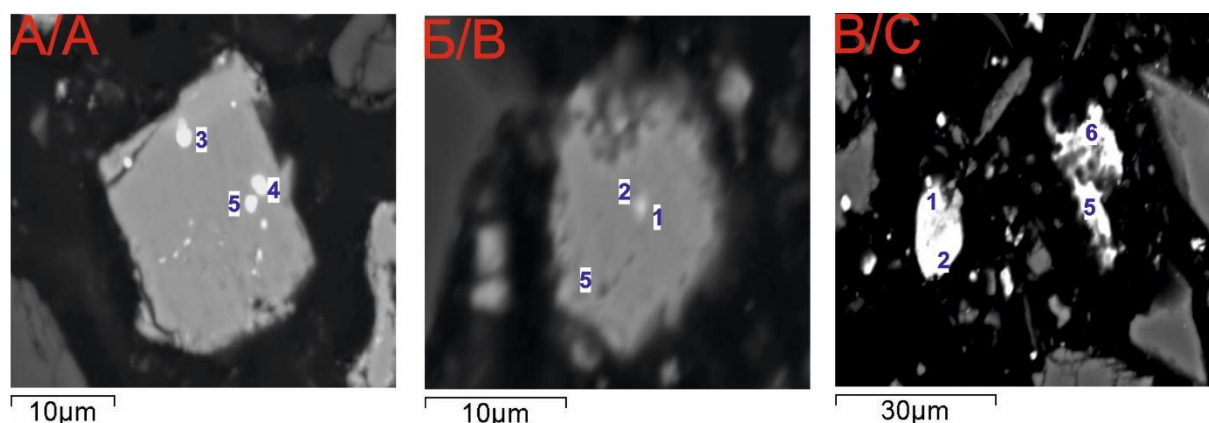


Рис. 2. Остаточная урановая минерализация после лабораторных опытов по выщелачиванию руд Добровольного месторождения (изображения в обратно-рассеянных электронах): А) оксид урана внутри кристалла пирита; Б) оксид урана в конкреции пирита; В) разъеденные выделения пирита

Fig. 2. Residual uranium mineralization after laboratory leaching experiments of the Dobrovolnoe deposit ores (images in back scattering electrons): А) uranium oxide inside a pyrite crystal; В) uranium oxide in pyrite nodule; С) corroded pyrite separations

Таблица 2. Результаты микрозондовых анализов кеков выщелачивания, остаточная урановая минерализация (к рис. 2)

Table 2. Results of microprobe analyses of cakes after leaching, residual uranium mineralization in pyrite nodules (to Fig. 2)

№ спектра Spectrum no.	Содержание элементов (мас. %) Contents of the elements (wt. %)					
	Si	S	Fe	U	Сумма Total	
А	3	0,20	32,35	27,34	34,97	95,70
	4	0,34	24,00	19,66	47,02	93,53
	5	0,63	26,32	21,24	43,47	92,67
Б	1	0,25	33,96	26,86	26,33	95,33
	2	0,12	44,55	37,88	10,72	99,18
В	5	1,43	48,22	37,39	0,95	88,96
	1	0,31	43,50	34,66	0,76	94,21
	2	0,49	40,41	32,98	0,31	82,02
	5	0,09	0,17	0,00	0,00	99,16
	6	0,00	0,14	0,08	0,06	99,74

Таблица 3. Химический состав пластовых вод на месте проведения двухскважинного опыта подземного выщелачивания (ПВ-89)

Table 3. Chemical groundwater composition at the site of the in situ leaching (ISL-89) experiment

Объект исследования Object of study	pH	Содержания, г/л/ Contents, g/l					Общая минерализация, г/л Total mineralization, g/l
		SO ₄ ²⁻	Cl	Na ⁺	Ca ⁺⁺	U	
состав пластовых вод до опыта* formation water composition before the experiment*	7,0	0,41	7,46	4,39	0,34	2*10 ⁻⁶	13,0
продуктивный раствор в конце опыта* productive solution in the end of the experiment*	1,4	28,0	7,4	6,0	0,75	0,2	41,0
состав современных пластовых вод** composition of modern formation water**	5,7	3,4–1,60	7,4	3,78	0,73	0–п*10 ⁻³	13,5

*по данным отчета Тургайской партии № 89 «Зеленогорскеологии»/according to the report of Turgai field party № 89 «Zelenogorsgeologii»;

**по данным ISP анализа водных вытяжек/according to the ISP analysis of water extracts.

Современное состояние водоносного горизонта

Рудовмещающий водоносный горизонт бурением вскрыт на глубине 513,4 ... 529,7 м, он гидравлически изолирован от выше- и нижезалегающих горизонтов. Особенностью месторождения является то, что статический уровень пластовых вод находится выше земной поверхности (+48 м). Воды рудоносного горизонта хлоридно-сульфатно-гидрокарбонатные, кальциево-натриевые. Воды месторождения нейтральные, слабощелочные (pH=7–7,2), минерализованные (13 г/л). Коэффициент фильтрации изменяется от 0,8 до 23,5 м/сут. Характеристика вод Добровольного месторождения представлена в табл. 3.

За 30 лет после окончания двухскважинного опыта значение pH водоносного горизонта восстановилось до слабокислого (pH=5,7), что связано с нейтрализационной способностью рудовмещающих пород. Основными загрязняющими компонентами при сернокислотной схеме СПВ являются сульфат-ионы [12]. На момент бурения контрольной скважины (2020 г.) количество сульфат-ионов в пластовых водах уменьшилось с 28 до 3,4...1,6 г/л, в зависимости от проницаемости вмещающих пород, ненамного превышая первоначальные значения, составляющие 0,41 г/л

Характеристика двухскважинного опыта

Натурный двухскважинный опыт по выщелачиванию урана [7] проводился в период с 06.01.1989 г. по 23.09.1989 г. (продолжительность 260 суток) Тургайской партией № 89 Зеленогорской экспедиции. В связи с напорным режимом подземных вод выщелачивающий сернокислотный раствор подавался в недра под давлением. Средняя концентрация кислоты в выщелачивающем растворе колебалась в пределах 20–40 г/л. Снижение pH до 2 установилось на 15 сутки опыта, а окислительно-восстановительный потенциал возрос до +460 мВ. Уран в растворе зафиксирован на 7 сутки опыта. Общая минерализация продуктивного раствора в конце опыта достигла 41 г/л, содержание сульфат-иона – 28 г/л; натрия – 6 г/л; кальция – 0,75 г/л; урана – 0,2 г/л (табл. 3).

Проведенный натурный опыт показал принципиальную возможность добычи урана методом СПВ по сернокислотной схеме на Добровольном месторождении [11–13].

(табл. 3). Общая минерализация вод также уменьшилась с 41 до исходных 13,5 г/л. Содержание ионов натрия в пластовых водах составляет 3,78 г/л, что меньше, чем в природных водах (4,39 г/л). Таким образом, с момента окончания опыта в пластовых водах значение pH от сильно кислого (1,4) восстановилось до слабо кислого (5,7) при первоначально нейтральных значениях. Общая минерализация достигла исходных значений 13,5 г/л, а содержание основных загрязняющих ионов уменьшилось практически до фоновых.

Состояние рудовмещающих пород на месте проведения опыта

Рудовмещающие породы в интервале 513,4...529,7 м после воздействия кислоты представлены преимущественно темно-серыми, обогащенными углистым растительным детритом терригенными разностями с единичными прослоями белесых и светло-серых разностей. Литологическая колонка с данными элементного и минерального состава приведена на рис. 3.

По всему разрезу рудовмещающего горизонта после проведения опыта установлен гипс в количестве от 0,5 до 3 %. Методом количественного рентгенографического фазового анализа (РКФА) в пробах обнаружи-

вадается незначительное количество новообразованного ярозита. Образование гипса связано с взаимодействием выщелачивающего раствора с кальцием, содержащимся в полевых шпатах. Гипс и ярозит являются характерными минералами, образующимися в породах после проведения СПВ по сернокислотной схеме [12].

Содержание серы в пределах рудоносного горизонта колеблется от 0,04 до 2 %, тогда как в исходных породах ее содержание составляло 0,34...1,36 %. Необходимо отметить, что на момент исследований максимальные содержания серы, железа, урана – 1–2, 10–16 и 0,1...1,0 %, соответственно, приурочены к интервалам 522,4...523,5 и 524,9...525,4 м разреза, представленным сероцветными и темно-серыми глинистыми разностями пород. Максимальные содержания серы и общего железа соответствуют максимальным содержаниям пирита, подтвержденным данными РКФА.

Морфологически пирит в проработанных породах представлен только крупными конкрециями и мелкими кристаллами. Мелкие кристаллы пирита распространены по периферии растительных остатков, нередко на границе с гипсом, который выполняет роль цемента песков или импрегнирует каолинит. В проработанных выщелачиванием отложениях отсутствует фрамбоидальный пирит, вероятно, разрушенный сернокислотными растворами.

Коэффициент радиоактивного равновесия (КРР), рассчитанный как отношение ^{226}Ra к ^{238}U [14] в рудомещающем горизонте, колеблется от 0,53 до 16. Не затронутые натурным опытом руды месторождения Добровольное являются равновесными [1]. Для процессов перераспределения урана, в том числе техногенных с частичным выносом или привносом урана, значения КРР больше 1 соответствуют процессам выноса урана, а меньше 1 – для его привноса в геологическую среду [15].

Содержание урана по разрезу колеблется от 0,002 до 1 %, причем в основном преобладают интервалы с содержанием урана в первые тысячные доли процента. В этих же интервалах значения КРР больше 1, что свидетельствует о выщелачивании урана в процессе СПВ. Два интервала с повышенным содержанием урана (522,4–523,4 и 524,9–525,4 м) характеризуются и повышенными значениями радия (15400–53500 Бк/кг), а значения КРР не превышают 0,5. Подобные соотношения КРР и содержания урана характерны для привноса урана, т. е. его переотложения [15].

Образец пиритовой конкреции с содержанием урана 0,32 % при экспозиции 4 суток характеризуется яркой пятнисто-точечной засветкой радиографии, которая совпадает с выделениями крупных стяжений и конкреций пирита.

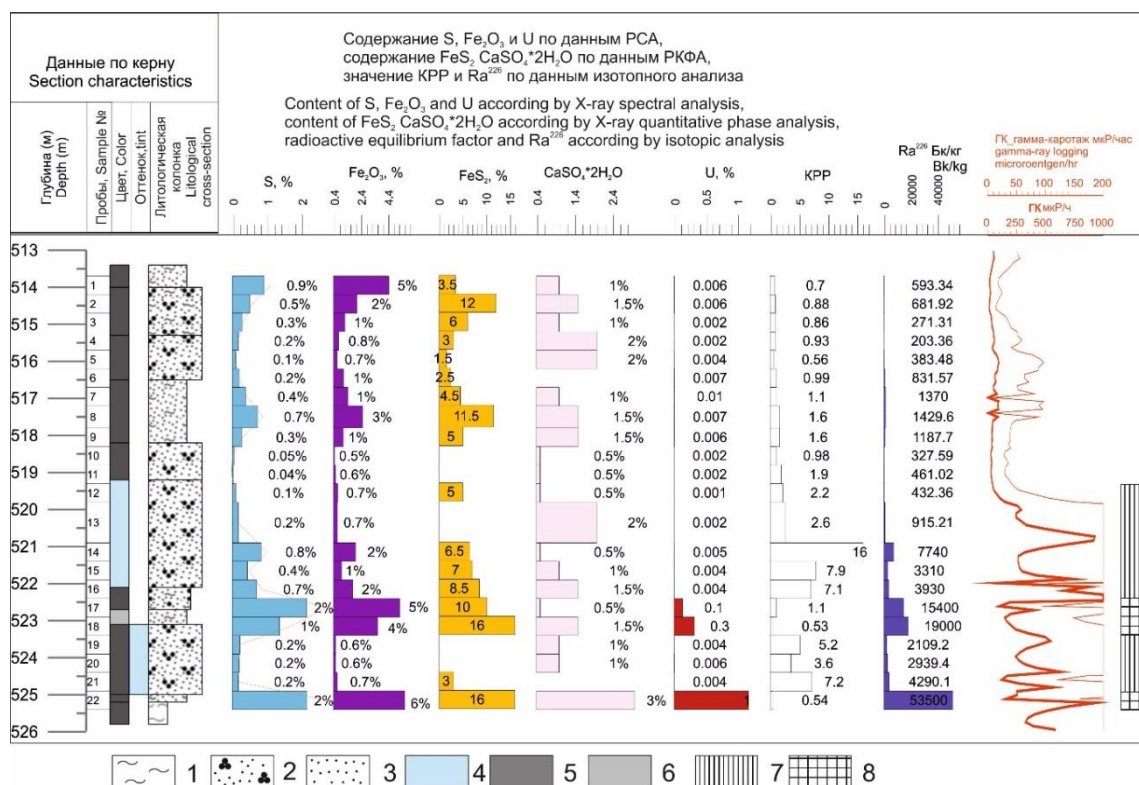


Рис. 3. Литологическая колонка на месте проведения двухскважинного опыта. Характеристика изменчивости элементного (S, Fe и U) и минерального (гипс и пирит) состава рудомещающих пород, радиоизотопные характеристики. Условные обозначения: 1) глинистые отложения; 2) разнозернистые пески; 3) мелкозернистые пески; цветовая характеристика пород: 4) белоцветные; 5) темно-серые; 6) сероцветные; 7) уровни выщелачивания урана; 8) уровни переотложения урана.

Fig. 3. Lithological column at the site of the two-hole experiment. Characteristics of variability of elemental (S, Fe and U) and mineral (gypsum and pyrite) composition, radioisotope characteristics: 1) clay, 2) differently-grained sand; 3) fine-grained sand; color characteristics rocks: 4) white-colored sediments, 5) dark gray sediments, 6) gray sediments; 7) levels of uranium leaching; 8) levels of uranium redeposition

При детальном изучении пиритовой конкреции, отобранной с аномального горизонта (523,3 м), установлено, что она имеет зональное строение – в цен-

тральной части наблюдается псевдоморфоза пирита по растительному остатку, которая к краю конкреции сменяется мелкористаллическим пиритом (рис. 4).

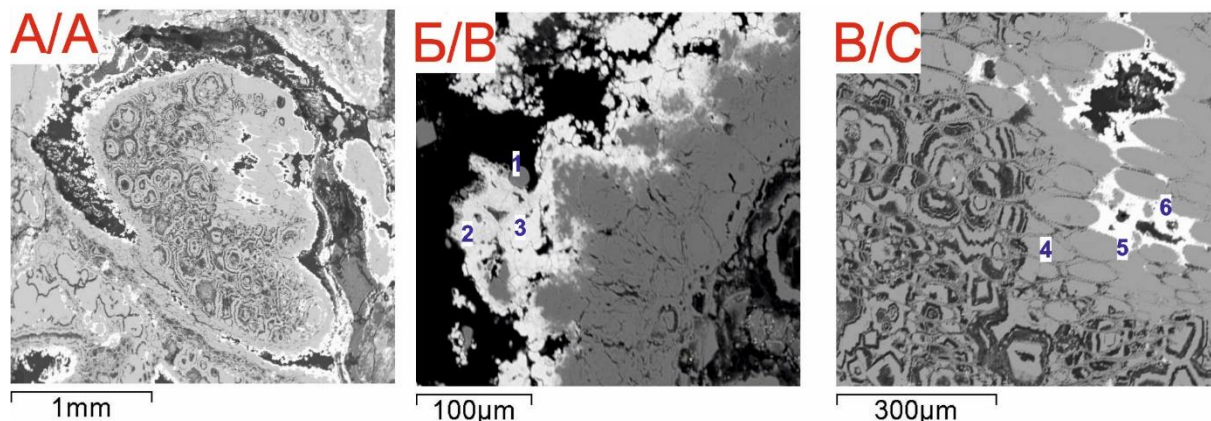


Рис. 4. Пиритовая конкреция (224/523,3 м) с интервала переотложенного урана. Фото в отраженных электронах: А) общий вид; Б) краевая часть конкреции; В) внутренняя часть

Fig. 4. Pyrite concretion (224/523,3 m) from the interval of redeposited uranium. Photo in reflected electrons: A) general view; B) marginal part of the concretion; C) inner part

Таблица 4. Результаты микрозондовых анализов переотложившей минерализации. Спектры 1–3 характеризуют урановую минерализацию внешней части конкреции; спектры 4–6 – урановую минерализацию внутренней части конкреции (к рис. 4)

Table 4. Results of microprobe analyses of uranium mineralization from the interval of uranium redeposition. Spectra 1–3 characterize the uranium mineralization of the outer part of the concretion; spectra 4–6 characterize the uranium mineralization of the inner part of the concretion (to Fig. 4)

№ спектра Spectrum no.	Содержание элементов (мас. %) / Contents of the elements (wt. %)							
	O	Na	P	S	Ca	Fe	U	Сумма / Total
1	–	–	–	53,59	–	43,31	0,34	98,19
2	23,09	0,69	2,28	0,90	2,01	0,23	60,13	99,04
3	23,60	0,67	2,43	–	2,01	2,60	55,90	100,88
4	–	–	–	53,45	–	43,72	–	97,84
5	21,61	0,20	2,65	1,12	1,96	–	57,88	96,49
6	23,79	0,36	2,48	1,29	1,95	–	58,76	99,60

Однотипный по составу урановый минерал фиксируется как внутри конкреции, так и в виде каемочки вокруг нее. Так как в неизмененных породах наблюдалось включение оксида урана в пирите, и он не выщелачивался при лабораторных опытах, можно предположить, что это соответствует остаточной минерализации. Каемочка урановой минерализации не наблюдалась в исходных рудах, что может косвенно подтверждать ее новообразование после окончания натурного опыта.

При изучении данного образца на электронном микроскопе хорошо видны новообразования, представленные кристаллами пирита и гипса [16] (спектры 3–5), а также отложениями многокомпонентных урансодержащих гелей (спектры 6 и 9). Помимо урана многокомпонентные гели характеризуются повышенным содержанием Al, Si, S, Cl, K, Ca и Fe. Именно эти гели являются

результатом повторной концентрации урана после процесса выщелачивания (рис. 5), и их наличие свидетельствует о том, что новообразованный уран восстанавливается непосредственно в рудной толще и не мигрирует на значительные расстояния.

Микробиологические исследования

Как показывают исследования Г.А. Шугиной и И.Н. Солодова [17, 18], а также зарубежных авторов [19], сульфатредуцирующие, денитрифицирующие и водородобразующие бактерии способны очищать техногенные растворы от сульфата и нитрата, а также создавать условия для восстановительного осаждения элементов с переменной валентностью [20]. Денитрифицирующие бактерии способны восстанавливать нитрат до молекулярного азота [21, 22].

Сульфатредуцирующие бактерии восстанавливают сульфат до сероводорода. Сероводород снижает Eh среды в области выклинивания зон окисления, что приводит к восстановлению растворенных в водах шестивалентного урана и сопутствующих элементов (Mo, Re и др.), резкому снижению их миграции и контрастному осаждению. Также были исследованы бактерии, способные сбраживать захороненное органическое вещество осадков (или внесенное с техногенными растворами) с образованием углекислоты и молекулярного водорода.

Микробиологические исследования проведены для пяти образцов, отобранных из керна скважины Р-224 с разных уровней – 513,1, 519,7, 521,8, 523,7 и 524,5 м [23]. Все образцы характеризуются очень низким количеством исследуемых бактерий. На всех изучаемых горизонтах установлены аэробные органотрофные бактерии и нити микроскопических грибов.

Образование молекулярного водорода бродильными бактериями зафиксировано только в посевах пробы (523,7). Образование нитрита из нитрата нитратредуцирующими/денитрифицирующими бактериями зафиксировано в посевах проб (519,7) и (524,5).

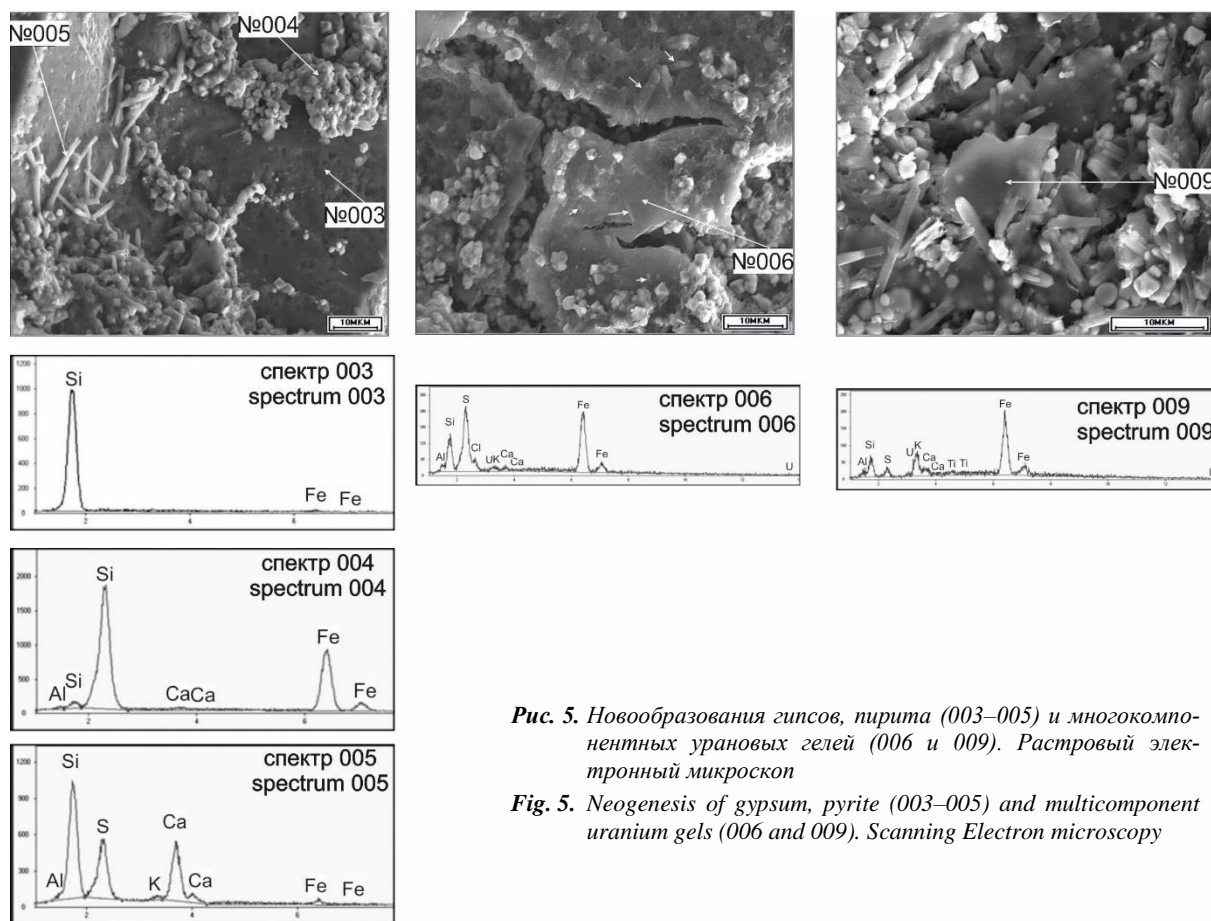


Рис. 5. Новообразования гипсов, пирита (003–005) и многокомпонентных урановых гелей (006 и 009). Растровый электронный микроскоп

Fig. 5. Neogenesis of gypsum, pyrite (003–005) and multicomponent uranium gels (006 and 009). Scanning Electron microscopy

Таблица 5. Результаты анализов на растровом электронном микроскопе элементов (мас. %) (к рис. 5)

Table 5. Results of the scanning electron microscopy element analysis (wt. %) (to Fig. 5)

№ спектра Spectrum no.	Содержание элементов (мас. %) Content of the elements (wt. %)						
	Al ₂ O ₃	SiO ₂	SO ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	U ₂ O ₃
4	3,81	–	–	1,22	36,68	–	–
5	–	–	17,52	13,2	2,13	–	–
6	4,381	32,22	23,51	1,11	31,52	–	2,39
9	6,88	30,19	–	3,17	–	1,24	–

Сульфатвосстанавливающие бактерии (103 кл/г керн) обнаружены на двух горизонтах – 521,8 и 519,7 м, в которых содержание пирита достигает 5 и 7 %, соответственно; это свидетельствует о том, что часть пирита, возможно, имеет бактериальное происхождения (рис. 3). В случае использования серной и азотной кислот, в первую очередь, возможна активизация процесса денитрификации с образованием молекулярного азота в зонах пласта с рН более 5 и концентрацией нитрата менее 10 г/л. Процесс сульфатредукции возможен только после удаления нитратов из подземных вод и снижения окислительно-восстановительного потенциала среды [24].

Характеристика процесса автоочищения продуктивного горизонта

За время отработки месторождений урана методом СПВ в странах, использующих данный метод (в ос-

новном Узбекистан и Казахстан), и последующего мониторинга состояния окружающей среды накопилось достаточно фактов об автоочистке горизонтов в зависимости от нейтрализационных способностей вмещающих пород [25, 26].

И.Н. Солодов [18] рассматривал формирование геотехнологических барьеров в пассивную стадию техногенеза как фактор, благоприятный для очищения пластовых вод. Проведенными исследованиями установлены следующие особенности состава остаточных растворов ранее проведенного опыта и состояния вмещающих пород.

Содержание ионов кальция находится на пределе растворимости гипса, и при дополнительном выщелачивании кальция из породы происходит осаждение гипса из раствора. Колебания концентраций сульфатов в диапазоне 0,5...1,5 г/л зависят от содержания гипса в породе и не являются показателем степени самоочистки подземных вод.

Техногенные растворы разрушаются в недрах в результате перемещения их в область нейтрализации исходными породами [17]. На Добровольном месторождении за 30 лет величина рН с 1,4 увеличилась до 5,7, что способствовало формированию нейтрализационного (геотехнологического) барьера. В результате перехода сульфат-иона из жидкой в твердую фазу за счет образования сульфида и сульфата бария его концентрация в растворе снижается [26].

Очистка от автохтонных компонентов (железо, алюминий, ванадий и др.) происходила за счет гидро-

лиза в процессе нейтрализации и сорбции на глинистые минералы [27]. Сорбционная емкость глинистых песков составляет около 100 г/т для растворов с $\text{pH} > 3$. Песчаные породы с содержанием глинистой фракции на уровне 20 % имеют сорбционную емкость около 20 г/т.

При подземном выщелачивании растворами серной кислоты под нейтрализационной емкостью пород понимается кислотоемкость, которая физически выражается в отношении массы нейтрализованной кислоты, выраженной в кг, к массе нейтрализующей породы, выраженной в т. Для определения сорбционных свойств и кислотоемкости были проведены опыты в трубчатой модели-колонке с сероцветными песками, обладающими кислотоемкостью 5–8 кг/т при объемной массе 1,83 т/м³. При подаче в колонку модельных растворов с содержанием серной кислоты до 5 г/л и содержанием урана 1–2 мг/л ($\text{pH}=2,86$) установлено, что нейтрализация сернокислотных растворов происходит до $\text{pH}=4$.

Сорбционная емкость алеврито-глинистой фракции для основных ионов-загрязнителей составляет: для U^{4+} до 15 г/т, для Al^{3+} до 40 г/т. При ее содержании в отложениях порядка 20 % удельная сорбционная емкость рудовмещающих пород должна определяться средней величиной 3 г/т. Учитывая объемный вес рудовмещающих пород (1,83 т/м³) и сорбционную емкость пород (3 г/т), получаем, что 1 м³ серых неизмененных проницаемых пород нейтрализует до 6 м³ остаточных кислых растворов.

Установлено, что 1 м³ сероцветных неизмененных пород с учетом установленных параметров объемной

массы и сорбционной способности должны обеспечивать нейтрализацию около 6 м³ остаточных сернокислых растворов. Очистка растворов происходит практически на всю мощность продуктивного горизонта.

Заключение

Изучение химического состава пород на месте проведения опыта позволило установить, что практически весь уран был выщелочен в процессе скважинного подземного выщелачивания. Фиксируются только два уровня с повышенным содержанием урана, которые связаны с его недовыщелачиванием и переотложением, что характерно для богатых руд. Переотложение урана происходит в виде многокомпонентных гелей в форме каемочки вокруг пиритовых конкреций. Невыщелачиваемая урановая минерализация связана с пиритовыми конкрециями и заключена в их центральных частях.

Спустя 30 лет после окончания опыта химический состав пластовых вод практически восстановился. Содержание основного загрязняющего техногенного компонента на Добровольном месторождении – сульфат-иона – уменьшилось до значений, не превышающих фоновые. С момента окончания опыта не изменилось содержание ионов кальция, что связано с выщелачиванием элемента из породообразующих минералов.

Таким образом, рудовмещающие породы обладают нейтрализующими свойствами, достаточными для очистки рудовмещающего горизонта от техногенных компонентов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Халезов А.Б. Месторождения урана в речных палеодолинах Уральского региона. Разновидности месторождений урана типа «несогласия» в фанерозое. – М.: Минеральное сырье № 34, ВИМС, 2017. – 193 с.
- Уран Российских недр / Г.А. Машковцев, А.К. Константинов, А.К. Мигута, М.В. Шумилин, В.Н. Щеточкин. – М.: ВИМС, 2010. – 850 с.
- Uranium 2020: resources, production and demand // A Joint Report by the Nuclear Energy Agency and the International Atomic Energy Agency. – Paris: OECD, 2020. – 480 p.
- Черновые фосфатные урановые руды Витимского плато (Бурятия) / О.А. Дойникова, Н.Н. Тарасов, П.М. Карташов, В.А. Петров // Радиохимия. – 2020. – Т. 62. – № 4. – С. 349–358.
- Кочкин Б.Т. Восстановительные новообразования на экзогенных инфильтрационных месторождениях урана и их связь с восходящими подземными водами // Геология рудных месторождений. – 2020. – Т. 62. – № 1. – С. 23–35.
- Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы // СанПиН 2.1.4.1074-01 «Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества. Гигиенические требования к обеспечению безопасности систем горячего водоснабжения». URL: <https://docs.cntd.ru/document/901798042> (дата обращения 22.12.2021).
- Грабовников В.А. Геотехнологические исследования при разведке металлов. – М.: Недра, 1983. – 121 с.
- Uranium mobility in organic matter-rich sediments: a review of geological and geochemical processes / S.A. Cumberland, G. Douglas, K. Grice, J.W. Moreau // Earth-Science Reviews. – 2016. – V. 159. – P. 160–185.
- Evolution and origins of pyrite in sandstone-type uranium deposits, northern Ordos Basin, north-central China, based on micromorphological and compositional analysis / Liang Yue, Yangquan Jiao, Liqun Wu, Hui Rong, Mostafa Fayek, Huili Xie // Ore Geology Reviews. – 2020. – V. 118. – P. 1–14.
- Халезов А.Б. Минералого-геохимическая и геотехнологическая зональность Далматовского месторождения урана (Зауралье) // Литология и полезные ископаемые. – 1997. – № 6. – С. 521–530.
- Подземное выщелачивание полиэлементных руд / Н.П. Лавров, И.Г. Абдулманов, К.Г. Бровин, А.К. Лисицин, Ю.В. Нестеров, В.В. Новосельцев, И.Н. Солодов, М.И. Фазлуллин, В.Я. Фарбер, Е.М. Шмариович. – М.: Изд-во Академии горных наук, 1998. – 446 с.
- Геотехнология урана (российский опыт): монография / под ред. И.Н. Солодова, Е.Н. Камнева. – М.: КДУ, Университетская книга, 2017. – 576 с.
- Салтыков А.С., Авдонин Г.И. Применение натуральных геотехнологических исследований на месторождениях урана различных геолого-промышленных типов // Разведка и охрана недр. – 2017. – № 12. – С. 34–42.
- Бахур А.Е., Гульнин А.В., Стародубов А.В. Одновременное определение ²³⁸U, ²²⁶Ra и коэффициента радиоактивного равновесия в урановых рудах методом инструментальной гамма-спектрометрии // Разведка и охрана недр. – 2011. – № 12. – С. 60–63.
- Радиоизотопные методы при поисках и оценке инфильтрационных месторождений урана в Южном Казахстане / А.Е. Бахур, Т.М. Овсянникова, Л.И. Мануилова, Е.В. Альперович-Ландо, С.А. Сяткин, В.Г. Карелин, И.А. Шишков // Материалы по геологии месторождений урана, редких и редкоземельных металлов. – М.: ВИМС, 2015. – № 159. – С. 363–377.
- Pore structure evolution characteristics of sandstone uranium ore during acid leaching / Sheng Zeng, Yuan Shen, Bing Sun, Ni Zhang, Shuwen Zhang, Song Feng // Nuclear Engineering and Technology. – 2021. – V. 53. – P. 4033–4041.
- Использование сульфатредуцирующей микрофлоры при очистке остаточных сернокислотных растворов ПВ на пласто-

- во-инфильтрационных урановых месторождений / Г.А. Шугина, К.Г. Бровин, Е.М. Шмариович, В.Т. Дубинчук, Р.И. Гольдштейн, Б.И. Натальченко // *Материалы по геологии месторождений урана, редких и редкоземельных металлов.* – М.: ВИМС, 1990. – № 125. – С. 123–135.
18. Солодов И.Н., Шугина Г.А., Зеленова О.И. Техногенные геохимические барьеры в рудоносных горизонтах гидрогенных месторождений урана // *Геохимия.* – 1994. – № 3. – С. 415–432.
19. The stability of microbially reduced U(IV); impact of residual electron donor and sediment ageing / L. Newsome, K. Morris, S. Shaw, D. Trivedi, J.R. Lloyd // *Chemical Geology.* – 2015. – V. 409. – P. 125–135.
20. In situ recovery of uranium – the microbial influence / C.M. Zammit, J. Brugger, G. Southam, F. Reith // *Hydrometallurgy.* – 2014. – V. 150. – P. 236–244.
21. Senko J.M., Dewers T.A., Krumholz L.R. Effect of oxidation rate and Fe(II) state on microbial nitrate-dependent Fe(III) mineral formation // *Appl. Environ. Microbiol.* – 2005. – V. 71. – P. 7172–7177.
22. Effects of nitrate on the stability of uranium in a bioreduced region of the subsurface / W.-M. Wu, J. Carley, S.J. Green, J. Luo, S.D. Kelly, J. van Nostrand, K. Lowe, T. Mehlhorn, S. Carroll, B. Boonchayanant, F.E. Löffler, D. Watson, K.M. Kemner, J. Zhou, P.K. Kitanidis, J.E. Kostka, P.M. Jardine, C.S. Criddle // *Environ. Sci. Technol.* – 2010. – V. 44. – P. 5104–5111.
23. Филогенетическое разнообразие и потенциальная активность бактерий и грибов в подземных горизонтах месторождения урана / Т.Л. Бабич, Е.М. Семенова, Д.Ш. Соколова, Т.П. Турова, С.Х. Биджиева, Н.Г. Лойко, Г.И. Авдонин, Н.И. Луценко, Т.Н. Назина // *Микробиология.* – 2021. – Т. 90. – № 5. – С. 574–588.
24. Change in bacterial community structure during in situ biostimulation of subsurface sediment cocontaminated with uranium and nitrate / N.N. North, Sh.L. Dollhopf, L. Petrie, J.D. Istok, D.L. Balkwill, J.E. Kostka // *Applied and Environmental Microbiology.* – 2004. – V. 10. – № 8. – P. 4911–4920.
25. Potential aquifer vulnerability in regions down-gradient from uranium in situ recovery (ISR) sites / J.A. Saunders, B.E. Pivetz, N. Voorhies, R.T. Wilkin // *Journal of Environmental Management.* – 2016. – V. 183. – P. 67–83.
26. Аренис В.Ж. Физико-химическая геотехнология. – М.: Изд-во «Горная книга», 2021. – 816 с.
27. Geochemical, mineralogical and microbiological characteristics of sediment from a naturally reduced zone in a uranium-contaminated aquifer / K.M. Campbell, R.K. Kukkadapu, N.P. Qafoku, A.D. Peacock, E. Leshner, K.H. Williams, J.R. Bargar, M.J. Wilkins, L. Figueroa, J. Ranville, J.A. Davis, P.E. Long // *Applied Geochemistry.* – 2012. – V. 27. – P. 1499–1511.

Поступила 20.04.2022 г.

Информация об авторах

Сащенко А.В., ведущий специалист отдела урана и редких металлов, Всероссийский научно-исследовательский институт минерального сырья им. Н.М. Федоровского.

Авдонин Г.И., заведующий лабораторией геотехнологической оценки месторождений, Всероссийский научно-исследовательский институт минерального сырья им. Н.М. Федоровского.

Тарханова Г.А., кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник отдела урана и редких металлов, Всероссийский научно-исследовательский институт минерального сырья им. Н.М. Федоровского.

Носков М.Д., доктор физико-математических наук, заместитель руководителя по научной работе и международной деятельности, заведующий кафедрой физики, Северский Технологический Институт Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ».

UDC 553.495:622.277 (470.58)

SELF-PURIFICATION OF THE PRODUCTIVE HORIZON AT THE SITE OF THE TWO-HOLE IN SITU LEACHING EXPERIMENT AT THE DOBROVOLNOE URANIUM DEPOSIT (KURGAN REGION)

Anna V. Sashchenko¹,
sashchenko@vims-geo.ru

Gennady I. Avdonin¹,
gosha1956@mail.ru

Galina A. Tarkhanova¹,
sashchenko@vims-geo.ru

Mikhail D. Noskov²,
MDNoskov@mephi.ru

¹ All-Russian Scientific-Research Institute of Mineral Resources named after N.M. Fedorovsky, 31, Staromonetny lane, Moscow, 119017, Russia.

² Seversk Technological Institute – branch of «National Research Nuclear University «MEPhI», 65, Kommunisticheskiiy avenue, Seversk, 636036, Russia.

The relevance of the topic is caused by the need to determine the nature of the elevated uranium content in sediments at the site of the two-hole in situ leaching experiment, to monitor the quality of groundwater, to identify its potential for self-restoration of natural equilibrium and conditions for self-purification of the ore-bearing horizon without the need for special reclamation.

The purpose of the research is to determine the neutralizing properties of ore-hosting rocks in relation to the technogenic components entering the subsoil during in situ leaching; study of changes in the concentration of polluting components in groundwater and the mineral composition of ore-bearing rocks at the site of the two-hole in situ leaching experiment.

Object is ore-bearing sediments and groundwater of the Taborinsky suite of Middle-Upper Jurassic age (J_{2-3ub}), studied at the site of the two-hole in situ leaching experiment (check borehole 224) within the Dobrovolnoe deposit.

Methods. Groundwater composition was studied directly at the drilling site of the check borehole; mineralogical and analytical studies were performed using traditional and precision methods in the laboratories of the All-Russian Scientific-Research Institute of Mineral Resources named after N.M. Fedorovsky, the studies were carried out using the JEOL JHA 8100 X-ray microanalyzer, equipped with an INCA energy dispersive prefix and a scanning electron microscope with the most representative sample in order to study the chemical composition, morphology and detailed pattern of the uranium mineralization distribution. Radioisotope studies were performed by gamma-spectrometric method using «ORTEC-65195-P/DSPecPlus» according to the methodology developed by All-Russian Scientific-Research Institute of Mineral Resources named after N.M. Fedorovsky. In order to study the effect of the vital activity of microorganisms on the physico-chemical properties of the medium, microbiological studies were carried out at the S.N. Vinogradsky Institute of Microbiology of the Russian Academy of Sciences.

Results. Uranium concentrations remaining after the two-hole in situ leaching experiment were identified; uranium redeposition intervals were determined. It was found that 30 years after the experiment, groundwater at the Dobrovolnoe deposit was restored almost to original state. It is confirmed that uranium in situ leaching at the Dobrovolnoe deposit is environmentally sound, and the burial of man-made components introduced into the ore-bearing horizon occurs in the immediate vicinity of the mining site.

Key words:

In situ leaching, uranium, Dobrovolnoe deposit, redeposition, neutralizing properties, exploration.

REFERENCES

1. Khalezov A.B. *Mestorozhdeniya urana v rechnykh paleodolinakh Uralskogo regiona. Raznovidnosti mestorozhdeniy urana tipa «nesoglasiya» v fanerozoie* [Uranium deposits in the river paleodolines of the Ural region. Varieties of uranium deposits of the «unconformity» type in the Phanerozoic]. Moscow, VIMS Publ., 2017. 193 p.
2. Mashkovtsev G.A., Konstantinov A.K., Miguta A.K., Shumilin M.V., Tsvetochkin V.N. *Uran rossiiskikh nedr* [Uranium in the Russian bowels]. Moscow, VIMS Publ., 2010. 850 p.
3. *Uranium 2020: resources, production and demand*. A Joint Report by the Nuclear Energy Agency and the International Atomic Energy Agency. Paris, OECD, 2020. 480 p.
4. Doynikova O.A., Tarasov N.N., Kartashov P.M., Petrov V.A. *Chernevye fosfatnye uranovye rudy Vitimskogo plato (Buryatiya)* [Uranium black phosphate ores of the Vitim plateau (Buryatia)]. *Radiochemistry*, 2020, vol. 62, no. 4, pp. 349–358.
5. Kochkin B.T. *Vosstanovitelnye novoobrazovaniya na ekzogennykh infiltratsionnykh mestorozhdeniyakh urana i ikh vyzvaz s voskhodyashchimi podzemnymi vodami* [Restorative neogenesis at the infiltration exogenous uranium deposits and their connection with ascending groundwater]. *Geology of ore deposits*, 2020, vol. 62, no. 1, pp. 23–35.
6. *Sanitarno-epidemiologicheskie pravila i normativy. SanPiN 2.1.4.1074-01 «Pityevaya voda. Gigenicheskie trebovaniya k kachestvu vody tseentralizovannykh sistem pityevogo vodosnabzheniya. Kontrol kachestva. Gidienicheskie trebovaniya k obespecheniyu bezopasnosti sistem goryachego vodosnabzheniya* [Sanitary and epidemiological rules and regulations. SanPiN 2.1.4.1074-01 «Potable water. Hygienic requirements for the water quality of centralized domestic water supply systems. Quality control. Hygienic requirements for ensuring the safety of hot water supply systems»]. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/901798042.html> (accessed 22 December 2021).
7. Grabovnikov V.A. *Geotekhnologicheskie issledovaniya pri razvedke metallov* [Geotechnical studies for the exploration of metals]. Moscow, Nedra Publ., 1983. 121 p.

8. Cumberland S.A., Douglas G., Grice K., Moreau J.W. Uranium mobility in organic matter-rich sediments: A review of geological and geochemical processes. *Earth-Science Reviews*, 2016, vol. 159, pp. 160–185.
9. Liang Yue, Yangquan Jiao, Liqun Wu, Hui Rong, Mostafa Fayek, Huili Xie. Evolution and origins of pyrite in sandstone-type uranium deposits, northern Ordos Basin, north-central China, based on micromorphological and compositional analysis. *Ore Geology Reviews*, 2020, vol. 118, pp. 1–14.
10. Khalezov A.B. Mineralogo-geokhimicheskaya i geotekhnologicheskaya zonalnost Dalmatovskogo mestorozhdeniya urana (Zauralye) [Mineralogical-geochemical and geotechnological zonality of the Dalmatovsky uranium deposit (Trans-Urals)]. *Lithology and Mineral Resource*, 1997, no. 6, pp. 595–604.
11. Laverov N.P., Abdulmanov I.G., Brovin K.G., Lisitsyn F.K., Nesterov Yu.V., Novoseltsev V.V., Solodov I.N., Fazlullin M.I., Farber V.Ya., Shmariovich E.M. *Podzemnoe vyshchelachivanie polielementnykh rud* [In-situ leaching of ores]. Moscow, Academy of mining Sciences Publ., 1998. 446 p.
12. *Geotekhnologiya urana (Rossiskiy opyt): monografiya* [Uranium Geotechnology (Russian experience): monograph]. Eds. I.N. Solodov, E.N. Kamnev. Moscow, KDU, University Book Publ., 2017. 576 p.
13. Saltykov A.S., Avdonin G.I. The application of field geotechnology studies for uranium deposits of various geology-industrial types. *Prospect and protection of mineral resources*, 2017, no. 12, pp. 34–42. In Rus.
14. Bakhur A.E., Gulynin A.V., Starodubov A.V. Simultaneous determination of ^{238}U , ^{226}Ra and ratio of radioactive equilibrium in the uranium ores by the method of instrumental gamma-ray spectrometry. *Prospect and protection of mineral resources*, 2011, no. 12, pp. 60–63. In Rus.
15. Bakhur A.E., Ovsyannikova T.M., Manuilov L.I., Alperovich-Lando E.V., Shatkin S.A., Karelin V.G., Shishkov A.I. Radioizotopnye metody pri poiskakh i otsenke infiltratsionnykh mestorozhdeniy urana v Yuzhnom Kazakhstane [Radioisotope methods in the search and evaluation of the infiltration type uranium deposits in southern Kazakhstan]. *Materialy po geologii mestorozhdeniy urana, redkikh i redkozemelnykh metallov* [Materials on the geology of uranium, rare and rare earth metals]. Moscow, VIMS Publ., 2015. No. 159, pp. 363–377.
16. Sheng Zeng, Yuan Shen, Bing Sun, Ni Zhang, Shuwen Zhang, Song Feng. Pore structure evolution characteristics of sandstone uranium ore during acid leaching. *Nuclear Engineering and Technology*, 2021, vol. 53, pp. 4033–4041.
17. Shugina G.A., Brovin K.G., Shmariovich E.M., Dubinchuk V.T., Goldstein R.I., Natalchenko B.I. Ispolzovanie sulfatredutsiruyshchey mikroflory pri ochistke ostatocnykh sernokislotnykh PV na plastovo-infiltratsionnykh uranovykh mestorozhdeniyakh [The use of sulfate-reducing microflora in the purification of residual ISL sulfuric acid solutions at the uranium ore deposits of the formation-infiltration type]. *Materialy po geologii mestorozhdeniy urana, redkikh i redkozemelnykh metallov* [Materials on the geology of uranium, rare and rare earth metals]. Moscow, VIMS Publ., 1990. No. 125, pp. 123–135.
18. Solodov I.N., Shugina G.A., Zelenova O.I. Tekhnogennye geokhimicheskie barery v rudonosnykh gorizontakh gidrogenykh mestorozhdeniy urana [Technogenic geochemical barriers in ore-bearing horizons of hydrogenic uranium deposits]. *Geochemistry*, 1994, no. 3, pp. 415–432.
19. Newsome L., Morris K., Shaw S., Trivedi D., Lloyd J.R. The stability of microbially reduced U(IV); impact of residual electron donor and sediment ageing. *Chemical Geology*, 2015, vol. 409, pp. 125–135.
20. Zammit C.M., Brugger J., Southam G., Reith F. In situ recovery of uranium – the microbial influence. *Hydrometallurgy*, 2014, vol. 150, pp. 236–244.
21. Senko J.M., Dewers T.A., Krumholz L.R. Effect of oxidation rate and Fe(II) state on microbial nitrate-dependent Fe(III) mineral formation. *Appl. Environ. Microbiol.*, 2005, vol. 71, pp. 7172–7177.
22. Wu W.-M., Carley J., Green S.J., Luo J., Kelly S.D., Van Nostrand J., Lowe K., Mehlhorn T., Carroll S., Boonchayanant B., Löffler F.E., Watson D., Kemner K.M., Zhou J., Kitanidis P.K., Kostka J.E., Jardine P.M., Criddle C.S. Effects of nitrate on the stability of uranium in a bioreduced region of the subsurface. *Environ. Sci. Technol.*, 2010, vol. 44, pp. 5104–5111.
23. Babich T.L., Semenova E.M., Sokolova D.Sh., Turova T.P., Bidzhieva S.H., Loiko N.G., Avdonin G.I., Lutsenko N.I., Nazina T.N. Phylogenetic diversity and potential activity of bacteria and fungi in the deep subsurface horizons of an uranium deposit. *Microbiology*, 2021, vol. 90, no. 5, pp. 574–588. In Rus.
24. North N. N., Dollhopf S. L., Petrie L., Istok J. D., Balkwill D. L., Kostka J. E. Change in Bacterial Community Structure during In Situ Biostimulation of Subsurface Sediment Cocontaminated with Uranium and Nitrate. *Applied and Environmental Microbiology*, 2004, vol. 10, no. 8, pp. 4911–4920.
25. Saunders J.A., Pivetz B.E., Voorhies N., Wilkin R.T. Potential aquifer vulnerability in regions down-gradient from uranium in situ recovery (ISR) sites. *Journal of Environmental Management*, 2016, vol. 183, pp. 67–83.
26. Arens V.Zh. *Fiziko-khimicheskaya geotekhnologiya* [Physico-chemical geotechnology]. Moscow, Mining book Publ., 2021. 816 p.
27. Campbell K.M., Kukkadapu R.K., Qafoku N.P., Peacock A.D., Leshner E., Williams K.H., Bargar J.R., Wilkins M.J., Figueroa L., Ranville J., Davis J.A., Long P.E. Geochemical, mineralogical and microbiological characteristics of sediment from a naturally reduced zone in a uranium-contaminated aquifer. *Applied Geochemistry*, 2012, vol. 27, pp. 1499–1511.

Received: 20 April 2022.

Information about the authors

Anna V. Sashchenko, leading specialist, All-Russian Scientific-Research Institute of Mineral Resources named after N.M. Fedorovsky.

Gennady I. Avdonin, head of the Laboratory of Geotechnological assessment of deposits, All-Russian Scientific-Research Institute of Mineral Resources named after N.M. Fedorovsky.

Galina A. Tarkhanova, Cand. Sc., senior research scientist, All-Russian Scientific-Research Institute of Mineral Resources named after N.M. Fedorovsky.

Mikhail D. Noskov, Dr. Sc., deputy head for Scientific Work and International Activities, head of the Department of Physics, Seversk Technological Institute – branch of State Autonomous Educational Institution of Higher Education «National Research Nuclear University «MEPhI».

УДК 544.02(282.256.615)

СТАБИЛЬНЫЕ ИЗОТОПЫ КАК ИНСТРУМЕНТ КОНТРОЛЯ ГРАНИЦ ЗАКРЫТЫХ ЭКОСИСТЕМ НА ПРИМЕРЕ БАСЕЙНА Р. ВИТИМ

Пыряев Александр Николаевич^{1,2},
pyrayev@igm.nsc.ru

Новиков Дмитрий Анатольевич^{3,1},
NovikovDA@ipgg.sbras.ru

Максимова Анастасия Алексеевна^{1,3},
rock.nastaya64@gmail.com

¹ Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН,
Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3.

² Новосибирский национальный исследовательский государственный университет,
Россия, 630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 1.

³ Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3/б.

Актуальность работы заключается в установлении влияния внешних макромасштабных факторов на изменение концентрационных и изотопных характеристик вод крупных водоемов.

Цель: исследование влияния переходов условно закрытых экосистем на состав стабильных изотопов (δD , $\delta^{18}O$ и $\delta^{13}C_{DIC}$) и насыщенность вод рек отдельными макрокомпонентами на примере р. Витим.

Методы. Анализ химического состава вод проводился методом титриметрии в проблемной научно-исследовательской лаборатории гидрогеохимии Инженерной школы природных ресурсов Томского политехнического университета. Определение комплекса величин δD , $\delta^{18}O$, $\delta^{13}C_{DIC}$ вод и растворенного неорганического углерода (DIC) проводилось в центре коллективного пользования ИГМ СО РАН с помощью прибора Isotope Ratio Mass Spectrometer FinniganTM MAT 253, снабженного приставками пробоподготовки H/Device и GasBench II.

Результаты. Представлены данные комплексного анализа изотопного состава водорода, кислорода вод и углерода растворенной углекислоты для одной из крупнейших рек Восточной Сибири – Витим, а также ряда ее притоков. Установлено, что значения δD и $\delta^{18}O$ изученных вод варьируют в диапазоне от $-173,0$ до $-149,1$ ‰ и от $-23,3$ до $-20,2$ ‰. Показано метеорное происхождение вод, построена локальная линия метеорных вод исследованного региона. Содержание DIC в изученных водах зависит от смены ландшафта. Значения $\delta^{13}C_{DIC}$ варьируют от $-17,1$ до $-9,0$ ‰ и свидетельствуют об участии в формировании DIC почвенной диффузионной и биогенной углекислоты. Полученная изотопно-концентрационная характеристика вод является инструментом, высокочувствительным к смене ландшафта – условной границы закрытых экосистем.

Ключевые слова:

Река Витим, поверхностные воды, стабильные изотопы кислорода, водорода, углерода, изотопно-концентрационная характеристика вод.

Введение

Река Витим, приток р. Лена, является одной из крупнейших рек Восточной Сибири, бассейн которой охватывает территорию более 7,5 тыс. км². Река Витим проходит огромный путь по Восточному Прибайкалью, минуя ряд условно закрытых экосистем Витимского государственного природного заповедника, включает в себя множество мелких и крупных притоков.

На текущий момент природные воды сибирских рек и водоемов в целом являются малоизученными с точки зрения стабильной изотопии кислорода и водорода вод, а также углерода растворенной углекислоты – DIC (dissolved inorganic carbon). Воды р. Витим и ее притоков не являются исключением, что следует расценивать как крупное упущение, поскольку вышеперечисленные параметры позволяют изучать историю вод прямыми методами [1]. Изотопный состав кислорода и водорода, а также $\delta^{13}C_{DIC}$, за последние десятилетия зарекомендовали себя как надежный ин-

струмент для решения вопросов генезиса природных вод [1, 2], источников влаги [3], взаимодействий в системе «вода–порода–газ–органическое вещество» [4–7], в исследованиях процессов водосбора, смешения водных потоков, межпластовых перетоков [8], переноса и седиментации влаги [3, 9, 10]. Получаемые изотопные данные позволяют оценить вклад индивидуальных источников в общее питание реки и ее притоков, оценить взаимодействие вод с окружающими породами и органическим веществом [4, 6, 7, 9, 10].

Поскольку р. Витим является крупнейшим притоком р. Лена в Прибайкалье, важно выяснить основные источники питания этой реки, вклад притоков в общий материальный баланс реки, берущей свое начало от маловодной речки Витимкан на западном побережье Байкала. Река имеет несколько резких смен условно закрытых экосистем на границах с горной местностью и равнинными участками. Исследовательский интерес состоял в изучении влияния одного из таких переходов на границе раздела горная мест-

ность (поселок Мама, Иркутская область, 58°18'20" с.ш. 112°54'23" в.д.) – равнина (поселок Витим, Республика Саха (Якутия), 59°26'43" с.ш. 112°34'30" в.д.) на характеристики изотопного состава вод и водоразтворенной углекислоты, выявлении применимости стабильной изотопии как инструмента для условного обозначения таких границ.

Материалы и методы

В ходе экспедиционных работ, проведенных в июне–июле 2019 г., было отобрано 20 проб вод как непосредственно из р. Витим, так и из ее притоков. Отбор проб проводился совместно с выполнением сейсморазведочных работ по реке Витим, предварительная пробоподготовка выполнялась в соответствии с общепринятыми методиками. На месте отбора пробы отфильтровывались через нейлоновый фильтр (0,45 мкм) для удаления взвеси с помощью системы вакуумной фильтрации, собирались в герметичные пробирки 50 мл, поверх крышек фиксировались парафильмом (Parafilm) для минимизации газообмена с окружением при транспортировке и хранении. Точки

отбора проб представлены на рис. 1, а, а результаты геохимических исследований приведены в [11]. Исследование изотопного состава кислорода, водорода вод, а также DIC проводилось в Аналитическом центре МИИ Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН на масс-спектрометре изотопных отношений FinniganTM MAT 253, снабженном приставками пробоподготовки H/Device (определения δD) и GasBench II (определения $\delta^{18}O$ и $\delta^{13}C$). Изотопный состав кислорода вод и углерода DIC определялись в соответствии с известными методиками [12–15] с применением приставки пробоподготовки GasBench II. Изотопный состав водорода вод проводился с помощью приставки пробоподготовки H/Device в соответствии с методикой, представленной в [3]. Все измерения проводились относительно материалов сравнения МАГАТЭ: NBS-18 и NBS-19 – при измерениях $\delta^{13}C_{DIC}$; VSMOW2, SLAP2 и GISP – при измерениях δD и $\delta^{18}O$ [16]. Погрешность измерений не превышала 0,1 ‰ при анализе изотопного состава углерода, 0,2 ‰ – кислорода и 2 ‰ – водорода.

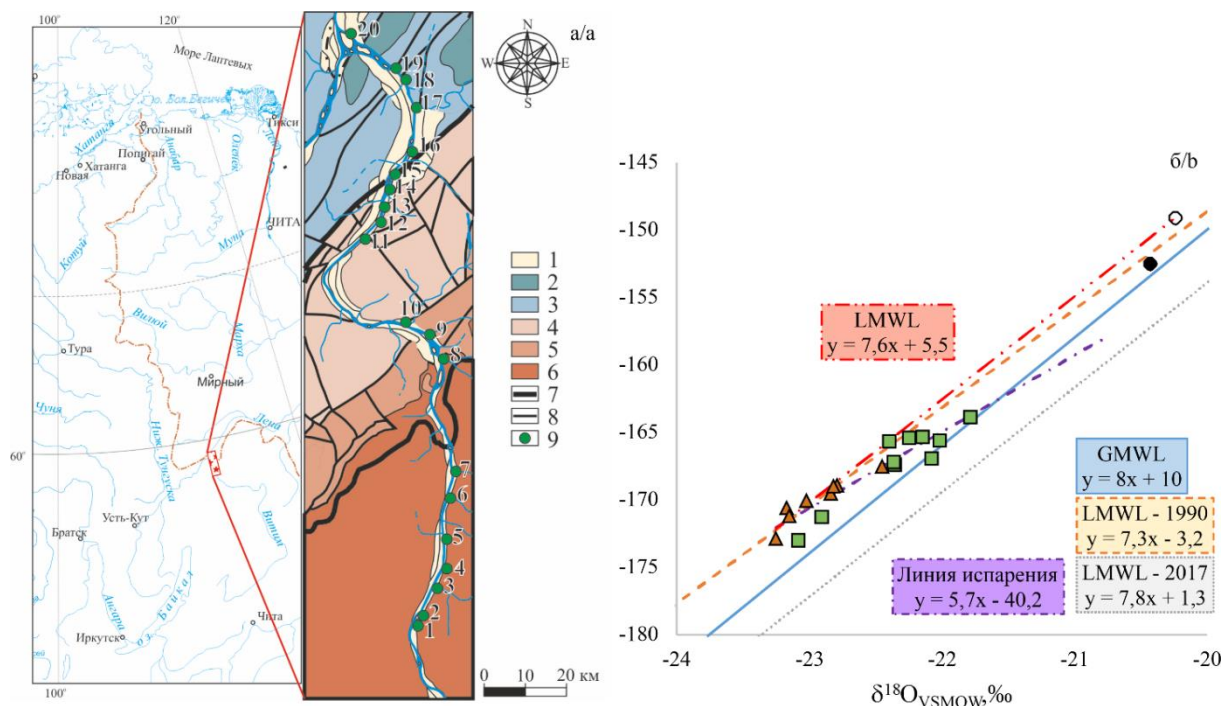


Рис. 1. а) карта-схема отбора проб (описание представлено в таблице). Отложения: 1 – четвертичные; 2 – ордовикские; 3 – кембрийские; 4 – вендские; 5 – рифейские; 6 – чуйско-нечерский гранитоидный комплекс; 7 – надвиги; 8 – разломы; 9 – точки отбора проб воды: 1 – р. Витим, 2 – ручей № 3, 3 – р. Максимиха, 4 – ручей № 2, 5 – ручей № 1, 6 – р. Иваниха, 7 – р. Барциха, 8 – р. Верхняя Язловая, 9 – р. Корюха, 10 – ручей № 4, 11 – р. Теплая, 12 – р. Желтовская, 13 – ручей № 5, 14 – р. Коробова, 15 – руч. Мысовой, 16 – р. Пыдриха, 17 – р. Быстрая, 18 – руч. Силинский, 19 – р. Дурная, 20 – устье р. Витим; б) значения δD и $\delta^{18}O$ для природных вод р. Витим (кружки) и ее притоков (треугольники и квадраты) относительно GMWL (Global Meteoric Water Line) и LMWL (Local Meteoric Water Line)

Fig. 1. а) schematic map of sampling (the description is presented in the table). Deposits: 1 – Quaternary; 2 – Ordovician; 3 – Cambrian; 4 – Vendian; 5 – Riphean; 6 – Chuy-Nechersky granitoid complex; 7 – thrusts; 8 – faults; 9 – water sampling points: 1 – r. Vitim, 2 – creek no. 3, 3 – r. Maksimikha, 4 – creek no. 1, 6 – r. Ivanikha, 7 – r. Barshikha, 8 – r. Upper Yazovaya, 9 – r. Koryukha, 10 – creek no. 4, 11 – r. Teplaya, 12 – r. Zheltovskaya, 13 – creek no. 5, 14 – r. Korobova, 15 – creek Mysovoy, 16 – r. Pydrikha, 17 – r. Bystraya, 18 – creek Silinsky, 19 – r. Durnaya, 20 – outfall of the r. Vitim; б) δD vs $\delta^{18}O$ values for natural waters of the Vitim River (circles) and its inflows (triangles and squares) relative to GMWL and LMWL

Результаты и обсуждение

Локальные линии метеорных вод

В таблице представлены данные по изотопному составу кислорода и водорода изученных природных вод, а на рис. 1, б они приведены в виде точек на зависимости $\delta D=f(\delta^{18}O)$ относительно глобальной (GMWL – сплошная линия на рис. 1, б) [17] и локальных (LMWL) [18] линий метеорных вод. Локальные линии метеорных вод даны для ближайшей точки наблюдений из представленных в международной базе данных Wisser – для города Иркутска, находящегося в 500 км юго-восточней исследуемого района. В базе данных представлены два набора данных – за 1969–1990 и 2011–2017 гг., в соответствии с которыми на рис. 1, б были нанесены соответствующие линии.

Положение локальных линий метеорных вод для Иркутска, приведенных в базе Wisser для разных временных

интервалов, существенно различается. Построения проводились на основе усредненных данных по изотопному составу атмосферных осадков для каждого из месяцев года. Однако для материалов за 1969–1990 гг. отсутствует усредненное значение изотопного состава осадков за декабрь месяц, а при построении графика не учитывается их изотопный состав за январь. Аналогичным образом поступили и авторы настоящей работы, получив соответствующее уравнение $\delta D=7,3 \times \delta^{18}O-3,2$ (рис. 1, б, штриховая линия). Аналогично построения проводились и для данных LMWL за 2011–2017 гг. с той лишь разницей, что во втором случае присутствует полный набор данных и все они учитывались при построении. Вторая линия метеорных вод описывается уравнением $\delta D=7,8 \times \delta^{18}O+1,3$ (пунктирная линия на рис. 1, б). Первая линия на зависимости $\delta D=f(\delta^{18}O)$ располагается выше GMWL, вторая – ниже.

Таблица. Состав стабильных изотопов H, O и DIC для природных вод р. Витим и ее притоков

Table. Stable isotope composition of the H, O and DIC in natural waters of the Vitim river and its inflows

№ на рис. 1, а No. in Fig. 1, а	Описание пробы Sample description	Условный тип притока Supposed inflow type	δD , ‰	$\delta^{18}O$, ‰	DIC, ммоль/л mmol/l	$\delta^{13}C_{DIC}$, ‰
1	р. Витим/г. Vitim	–	-149,1	-20,2	0,5	-14,2
2	Безымянный ручей № 3, приток р. Витим No name creek no. 3, r. Vitim inflow	горный highland	-168,9	-22,8	0,3	-10,7
3	Устье р. Максимиха, приток р. Витим Mouth of the Maksimikha river, r. Vitim inflow		-170,1	-23,0	0,4	-10,4
4	Безымянный ручей № 2, приток р. Витим No name creek no. 2, r. Vitim inflow		-169,5	-22,8	0,2	-10,9
5	Безымянный ручей № 1, приток р. Витим No name creek no. 1, r. Vitim inflow		-169,0	-22,8	0,3	-10,5
6	р. Иваниха, приток р. Витим r. Ivanikha, r. Vitim inflow		-167,5	-22,5	0,3	-17,1
7	р. Барщиха, приток р. Витим r. Barshchikha, r. Vitim inflow		-170,6	-23,2	0,3	-14,4
8	р. Верх-Язювая, приток р. Витим r. Verkh-Yazovaya, r. Vitim inflow		-172,8	-23,3	0,3	-9,0
9	р. Корюха, приток р. Витим r. Koryukha, r. Vitim inflow		-171,2	-23,2	0,5	-11,6
10	Безымянный ручей № 4, приток р. Витим No name creek no. 4, r. Vitim inflow		равнинный flatland	-173,0	-23,1	1,7
11	р. Теплая, приток р. Витим r. Teplaya, r. Vitim inflow	-165,6		-22,0	1,5	-9,0
12	р. Желтовская, приток р. Витим r. Zheltovskaya, r. Vitim inflow	-165,3		-22,1	1,9	-12,7
13	Безымянный ручей № 5, приток р. Витим No name creek no. 5, r. Vitim inflow	-167,4		-22,4	2,2	-14,1
14	р. Коробова, приток р. Витим r. Korobova, r. Vitim inflow	-165,7		-22,4	1,5	-12,4
15	ручей Мысовой, приток р. Витим Mysovoy creek, r. Vitim inflow	-163,9		-21,8	2,5	-11,6
16	р. Пыдриха, приток р. Витим r. Pydriha, r. Vitim inflow	-165,4		-22,3	1,7	-11,0
17	р. Быстрая, приток р. Витим r. Bystraya, r. Vitim inflow	-167,2		-22,4	1,6	-10,1
18	ручей Силинский, приток р. Витим Silinsky creek, r. Vitim inflow	-171,3		-22,9	3,3	-12,0
19	р. Дурная, приток р. Витим r. Durnaya, r. Vitim inflow	-166,9		-22,1	1,6	-14,8
20	Устье р. Витим/Mouth of the Vitim river	–	-152,5	-20,4	0,4	-11,6

В чем заключается причина столь сильного различия положений локальных метеорных линий, на текущий момент определить сложно. Полученные в настоящей работе изотопные данные хорошо согласуются с трендом LMWL за 1969–1990 гг.: большинство точек находится в диапазоне значений между

глобальной и локальной линиями метеорных вод, что указывает на преобладающее метеорное питание исследованных рек и ручьев. Смещение полученных точек выше GMWL указывает на холодные и засушливые условия формирования влаги [3, 19, 20], питающей метеорные осадки в исследованном районе, от-

носителем усредненных условий, для которых построена глобальная зависимость $\delta D = 8 \times \delta^{18}O + 10$. По-видимому, сравнение полученных данных с Иркутской LMWL не вполне корректно, поскольку исследованные в настоящей работе водоемы находятся существенно северней, где климат, предположительно, более холодный и засушливый. Соответственно, следует ожидать повышенных значений дейтериевого эксцесса $d = \delta D - 8 \times \delta^{18}O$ [21] для влаги, формируемой в таких условиях.

Так, в работе [22] показано, что для снежного покрова Байкальского региона характерна широкая вариация как изотопного состава кислорода и водорода, так и величины d , которая варьирует от $-1,56$ ‰ на $52,3^\circ$ с.ш., $116,5^\circ$ в.д. до $+29$ ‰ в городе Алдан ($58,5^\circ$ с.ш. $125,3^\circ$ в.д.). Логично предположить, что для вод, отобранных по течению р. Витим от ~ 58 до $\sim 59,5^\circ$ с.ш. следует ожидать значений величины d , соизмеримых с таковой для г. Алдан, то есть повышенной в сравнении с GMWL, где $d = 10$ ‰. В нашем случае величина d составляла от $9,7$ до $14,8$ ‰, что вполне согласуется с вышеописанной логикой, но накладывает определенные ограничения на сравнение полученных данных с локальными метеорными линиями для Иркутска (где величина d , согласно [18], составляет от $-3,2$ до $+1,3$ ‰). Иными словами, для корректной интерпретации данных необходимо построение LMWL для исследованного района, что требует дополнительного длительного исследования с отбором атмосферных осадков в течение как минимум одного сезона. Поэтому в настоящей работе на основании полученных данных для проб с минимальным предполагаемым испарением была построена условная локальная линия метеорных вод, выражаемая уравнением $\delta D = 7,6 \times \delta^{18}O + 5,5$ (рис. 1, б, штрихпунктирная линия с двумя точками). Дальнейший анализ данных будет основан на этой линии.

Изотопный состав кислорода и водорода исследованных вод

Изотопный состав изученных природных вод варьирует в интервале от $-173,0$ до $-149,1$ ‰ для водорода и от $-23,3$ до $-20,2$ ‰ для кислорода. Для вод р. Витим относительно ее притоков характерны существенно более тяжелые значения δD (от $-152,5$ до $-149,1$ ‰) и $\delta^{18}O$ (от $-20,4$ до $-20,2$ ‰), что выделяет их в отдельную группу (кружки на рис. 1, б; пробы № 1 и 20 в таблице). Большинство полученных точек располагаются выше GMWL, но хорошо ложатся на условную локальную линию метеорных вод ($\delta D = 7,6 \times \delta^{18}O + 5,5$).

Ряд точек несколько отклоняется от LMWL в сторону обогащения тяжелыми изотопами D и ^{18}O . В наибольшей степени это характерно для вод равнинных притоков р. Витим, отмеченных на рисунках квадратами. Этот эффект обусловлен испарением вод с поверхности указанных водоемов [1] и особенно усугубляется для водоемов малой глубины и малой скорости потока [10, 23]. Изменение изотопного состава вод под влиянием эффекта испарения может быть выражено локальной линией испарения

$\delta D = 5,7 \times \delta^{18}O - 40,2$ (рис. 1, б). Большинство проб, отобранных из притоков р. Витим в горной области (треугольники на рисунках) имеют изотопный состав водорода и кислорода, согласуемый с уравнением LMWL. То есть для них проявление эффектов испарения выражено в существенно меньшей степени, что, по-видимому, связано с большей скоростью их потоков и уменьшением времени парогазового обмена с атмосферой относительно медленных равнинных потоков.

Несмотря на множество притоков, для вод р. Витим изотопный состав кислорода и водорода сохраняется практически неизменным: за весь исследованный маршрут изотопный состав водорода вод изменился с $-149,1$ (рядом с п. Мама) до $-152,5$ ‰ (рядом с п. Витим) при изменении $\delta^{18}O$ от $-20,2$ до $-20,4$ ‰, соответственно. Следовательно, вклад притоков в питание реки на изученном участке следует рассматривать как невысокий. На основании расчетов из простого уравнения смешения [1] вклад притоков составляет не более 18 %. В свою очередь, обеднение вод притоков тяжелыми изотопами, по-видимому, обусловлено их высотным питанием и, как следствие, проявлением высотного градиента [1], выраженного сильнее для горных притоков Витима: для них изотопный состав водорода в среднем легче на $2-3$ ‰ относительно равнинных. Второй причиной легкого изотопного состава притоков может служить присутствие в их питании большой доли подземных вод, имеющих в теплый период года, как правило, более легкий изотопный состав, за счет усреднения изотопного состава вод по осадкам всего года [1, 24] и, соответственно, вклада изотопно-легких осадков холодного сезона.

Таким образом, на исследованном участке вклад притоков в питание реки Витим оказался несущественным. Тем не менее наблюдается небольшой прирост содержания легких изотопов H и ^{16}O в водах р. Витим, что может быть использовано в качестве полуколичественного показателя для оценки питания реки.

Изотопно-концентрационная характеристика DIC

В таблице и на рис. 2 приведена изотопно-концентрационная характеристика DIC для изученных вод. Содержание DIC в водах рассчитывали как сумму диссоциатов угольной кислоты ($CO_{2\text{водн}} + CO_3^{2-} + HCO_3^-$). Для всех изученных вод доминирующим (более 50 %) в указанной тройке служил гидрокарбонат-ион. В зависимости от содержания и изотопного состава DIC исследованные воды можно подразделить на две большие группы: низкоуглеродистые (с содержанием DIC менее 1 ммоль/л; водотоки горной местности, отмеченные треугольниками, и воды р. Витим, отмеченные кружками на рисунках) и высокоуглеродистые (содержание DIC более 1,5 ммоль/л; водотоки равнинной местности, отмеченные квадратами).

Согласно [25], при стандартных условиях ($25^\circ C$, $pH = 5,5$ и нормальной концентрации CO_2 в воздухе 360 ppmv) содержание DIC в метеорных водах, поглощенного исключительно из атмосферной двуокиси углерода, не превышает 10 ммоль/л. В нашем случае

концентрация DIC превышает указанное значение на 1–2 порядка. Следовательно, вклад атмосферного CO₂ в общий состав DIC может рассматриваться как не-

существенный, а основными источниками водорастворенной углекислоты в водах следует рассматривать почвенный диоксид углерода.

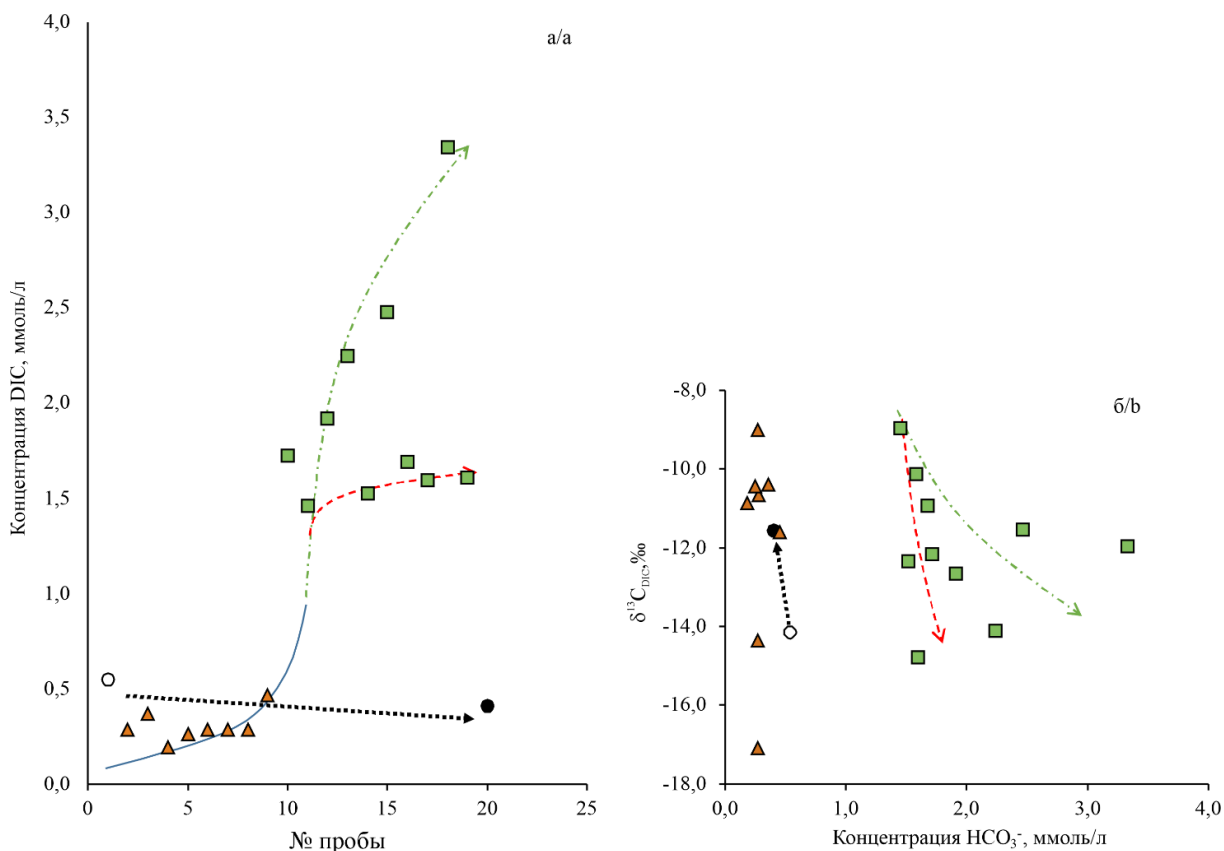


Рис. 2. а) вариация концентрации DIC в исследованных водах; б) изотопно-концентрационная характеристика DIC изученных вод. Пояснения – в тексте

Fig. 2. a) variation of the DIC concentration in the investigated waters; б) $\delta^{13}C$ vs DIC concentration in the studied waters. See text for explanations

Изменение концентрации DIC в изученных водах носит интересный характер. Начиная с точки отбора № 10 (после р. Корюха), концентрация DIC в водах притоков р. Витим существенно возрастает (рис. 2, а). При этом наблюдается переход от горного к пологому равнинному ландшафту площадей водосбора и изменение типа горных пород, с которыми происходит взаимодействие вод – от силикатных к карбонатным. Кроме того, рост содержания DIC в водах существенно различается для разных водотоков: постепенное нарастание в случае рек Теплая, Коробова, Пыдриха, Быстрая, Дурная (штриховая линия на рис. 2, а) и резкое – для ручьев № 4, 5, Мысового, Силинского и реки Желтовская (штрихпунктирная линия на рис. 2, а). Для выявления причин такого различия трендов вариации содержания DIC в водах необходимы дополнительные исследования притоков р. Витим.

На текущий момент можно предположить, что эти закономерности связаны со скоростями, объемом и глубиной водотоков. Для водотоков с малой глубиной и объемом вод, высокой турбулентностью их потока, скорость обменных реакций с окружением должна быть выше (рис. 3, слева). С одной стороны, для таких потоков должны наблюдаться повышенные ско-

рости газообмена с атмосферой за счет больших градиентов концентраций O₂ и CO₂ между этими средами [26] и, следовательно, насыщение вод кислородом и обеднение углекислотой. С другой стороны, насыщение вод кислородом должно способствовать окислению органических веществ (ОВ), присутствующих в водах, до углекислоты, вызывая тем самым обогащение вод изотопно-легкой углекислотой. При этом важно принимать во внимание интенсификацию процессов выветривания окружающих пород (в данном случае карбонатных, изотопно-тяжелых).

Применим ту же логику для более объемных водотоков с большой глубиной и меньшей скоростью потока (то есть низкой его турбулентностью и предпочтительно ламинарным течением – рис. 3, справа). Газообмен с атмосферой должен быть существенно хуже. Воды в меньшей степени насыщаются кислородом, и процессы деградации ОВ протекают менее интенсивно (с меньшей скоростью), при этом потери CO₂ из воды в атмосферу также меньше. Процессы изотопного обмена DIC с породами также должны быть замедлены, поскольку слой водной пленки рядом с твердым веществом (породой) в этом случае будет практически неподвижным.

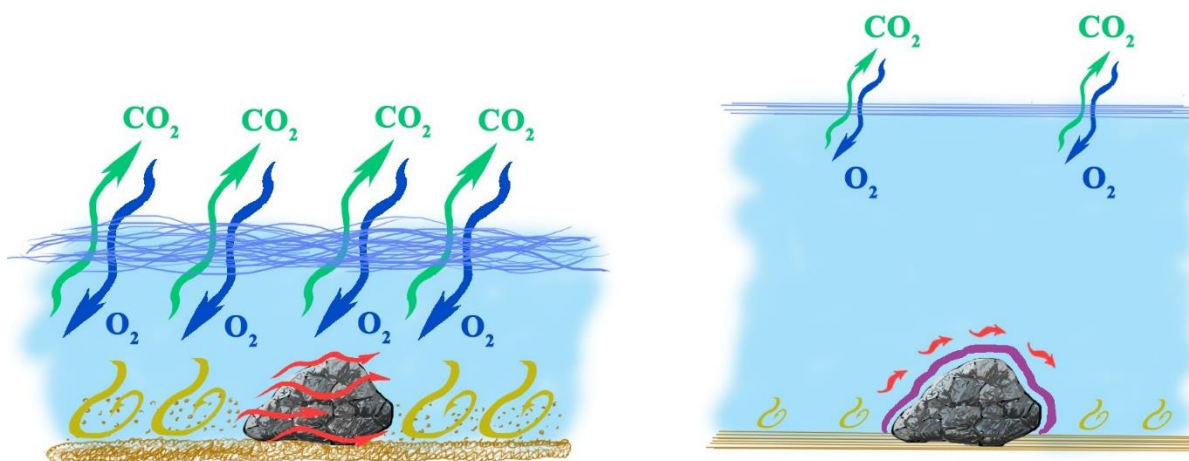


Рис. 3. Схема взаимодействия вод с окружением для неглубоких скоростных (слева) и глубоких медленных (справа) водотоков: синие и зеленые стрелки – газообмен вод с атмосферой; коричневые завихрения – подъем частиц осадка (в т. ч. органического) со дна водоема; красные стрелки – обтекание водой пород, способных к изотопному обмену; фиолетовая граница – малоподвижная пленка воды на поверхности породы

Fig. 3. Scheme of interaction of waters with the environment for shallow high-speed (left) and deep slow (right) watercourses: blue and green arrows – gas exchange of water with the atmosphere; brown swirls – rise of sediment particles (including organic) from the bottom of the reservoir; red arrows – water flow around rocks capable of isotopic exchange; violet border – inactive water film on the rock surface

Изотопный состав DIC дает представление об источниках водорастворенной углекислоты. Почвенную углекислоту, вносящую основной вклад в содержание DIC в исследованных водах, следует разбить на две базовых компоненты: диффузионный CO_2 , поглощаемый почвами из атмосферы, и биогенный углекислый газ, образуемый при окислении органических веществ. Диффузионная углекислота наследует изотопный состав атмосферного CO_2 (около $-8,5\text{‰}$ [27]), в то время как изотопный состав биогенной определяется типом ОВ, в большинстве случаев – растительного происхождения. Например, подавляющее большинство растений Новосибирской области, для которых характерны значения $\delta^{13}\text{C} = -27,8 \pm 2\text{‰}$ [25], имеют фотосинтез типа C_3 .

Значения $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ в изученных водах варьируют от $-17,1$ до $-9,0\text{‰}$. При этом для двух групп вод с различными скоростями набора концентрации DIC (рис. 2, а) наблюдаются индивидуальные закономерности изменения изотопного состава углекислоты (рис. 2, б, штриховая и штрихпунктирная стрелки). В случае рек Теплая, Коробова, Пыдриха, Быстрая, Дурная, где прирост концентрации DIC небольшой, постепенный, углекислота насыщается легким углеродом. В случае ручьев № 4, 5, Мысового Силинского и реки Желтовская, где прирост концентрации DIC существенно выше, набор легкой углекислоты идет существенно медленнее. С одной стороны, это обусловлено многообразием источников DIC с различным изотопным составом, с другой – конкуренцией указанных выше процессов (комментарии к рис. 3), влияющих на интенсивность изотопного обмена DIC с горными породами при их выветривании. Соответственно, во второй группе водотоков изотопный обмен вод с карбонатными породами протекает эффективней, что приводит к затянутому (инерционному) обогащению DIC легким изотопом ^{12}C .

Заметим, что для р. Витим концентрация DIC в конце исследованного маршрута снижается относительно начальной точки отбора. При этом значение $\delta^{13}\text{C}$ становится более тяжелым (увеличивается от $-14,2$ до $-11,6\text{‰}$). Очевидно, это свидетельствует о том, что в питании реки в большей степени принимают участие горные притоки, для которых характерны меньшие концентрации и более тяжелый изотопный состав DIC.

Выводы

1. В работе изучены воды р. Витим и ее притоков на участке раздела горная местность (поселок Мама, Иркутская область) – равнина (поселок Витим, Республика Саха). На основании полученных данных построена условная локальная линия метеорных вод $\delta\text{D} = 7,6 \times \delta^{18}\text{O} + 5,5$, подтверждение положения которой требует отдельного исследования.
2. Все исследованные воды имеют метеорное происхождение. Наблюдается существенная разница в изотопном составе вод р. Витим и ее притоков. Вклад притоков в питание реки на изученном участке оценен как невысокий – не более 18 %. Более легкий изотопный состав вод притоков обусловлен проявлением высотного градиента и участием подземных вод в питании притоков. Небольшой прирост содержания легких изотопов H и ^{16}O в водах р. Витим в конце исследованного маршрута может быть использован в качестве полуколичественного показателя для оценки питания реки.
3. Показано, что полученная изотопно-концентрационная характеристика DIC проявляет себя как высокочувствительный инструмент, проявляющий границу раздела выделенной условно замкнутой экосистемы – горного массива Витимского заповедника. Вариации изотопного состава

углерода проявляют себя индивидуально для различных водотоков. На текущий момент выявлена общая закономерность – обогащение вод углекислотой на равнинных участках притоков реки и обеднение значений $\delta^{13}\text{C}$, контролируемое комплексом взаимосвязанных процессов. Для р. Витим концентрация DIC в конце исследованного маршрута снижается относительно начальной точки отбора. При этом значение $\delta^{13}\text{C}$ становится более тяжелым (увеличивается от $-14,2$ до $-$

$11,6$ ‰). Очевидно, это свидетельствует о том, что в питании реки в большей степени принимают участие горные притоки, для которых характерны меньшие концентрации и более тяжелый изотопный состав DIC.

Исследования проводились при финансовой поддержке проекта Министерства науки и высшего образования РФ № FWZZ-2022-0014 и РФФИ в рамках научного проекта № 18-05-70074 «Ресурсы Арктики».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ферронский В.И., Поляков В.А. Изотопия гидросферы. – М.: Научный мир, 2009. – 632 с.
2. Hoefs J. Stable isotope geochemistry. 8th ed. – Springer International Publishing AG, part of Springer Nature, 2018. – 460 p.
3. Seasonal deuterium excess variations of precipitation at Summit, Greenland, and their climatological significance / B.G. Kopec, X. Feng, E.S. Posmentier, L.J. Sonder // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. – 2019. – V. 124. – P. 72–91.
4. Isotope ($\delta\text{D}, \delta^{18}\text{O}, \delta^{13}\text{C}, \delta^{14}\text{C}$) and chemical (B, Cl) constrains on water origin, mixing, water-rock interaction and age of low-temperature geothermal water / A. Stefánsson, S. Arnorsson, A.E. Sveinbjörnsdóttir, J. Heinemaier // Applied Geochemistry. – 2019. – V. 108. – 104380.
5. Hydrochemical and isotopic characterization of groundwater in the Ghis-Nekor plain (northern Morocco) / D. Chafouq, A.El. Mandour, M. Elgettafi, M. Himi, I. Chouikri, A. Casas // Journal of African Earth Sciences. – 2018. – V. 139. – P. 1–13.
6. Quantifying carbon isotope disequilibrium during in-cave evolution of drip water along discrete flow paths / P.J. Mickler, P. Carlson, J.L. Banner, D.O. Breecker, L. Stern, A. Guilfoyle // Geochimica et Cosmochimica Acta. – 2019. – V. 244. – P. 182–196.
7. Mora G., Blaser L. Effect of catchment lithology on dissolved inorganic carbon budgets in suburban streams of Baltimore, Maryland, during rainfall minima // Geosciences Journal. – 2020. – V. 24. – № 1. – P. 85–96.
8. Новые данные по изотопному составу ($\delta^{13}\text{C}$, δD , $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^{17}\text{O}$, $\delta^{34}\text{S}$) рассолов Сибирской платформы / Д.А. Новиков, А.Н. Пыряев, А.В. Черных, Ф.Ф. Дульцев, А.В. Ильин, Е.О. Чертовских // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов – 2021. – Т. 332. – № 7. – С. 20–33.
9. Newman C.P., Poulson S.R., Hanna B. Regional isotopic investigation of evaporation and water-rock interaction in mine pit lakes in Nevada, USA // Journal of Geochemical Exploration. – 2020. – V. 210. – 106445. – 15 p.
10. Первые изотопно-гидрогеохимические данные по природным водам юго-восточного склона кряжа Чекановского (Арктические районы Сибирской платформы) / Д.А. Новиков, А.А. Максимова, А.Н. Пыряев, П.А. Ян // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 11. – С. 157–167.
11. Геохимические особенности природных вод бассейна реки Витим (западные районы Патомского нагорья) / Д.А. Новиков, А.А. Максимова, Д.В. Напеев, Ю.Г. Копылова, А.А. Хвашевская // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 8. – С. 7–17.
12. Epstein S., Mayeda T. Variation of O 18 content of waters from natural sources // Geochimica et Cosmochimica Acta. – 1953. – V. 4 (5). – P. 213–224.
13. Nelson S.T. A simple, practical methodology for routine VSMOW/SLAP normalization of water samples analyzed by continuous flow methods // Rapid Commun. Mass Spectrom. – 2000. – V. 14. – P. 1044–1046.
14. Carbon isotope signature of dissolved inorganic carbon (DIC) in precipitation and atmospheric CO₂ / M. Górka, P.E. Sauer, D. Lewicka-Szczebak, M.-O. Jedrysek // Environmental Pollution. – 2011. – V. 159. – P. 294–301.
15. Correction algorithm for online continuous flow $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ carbonate and cellulose stable isotope analyses / M.N. Evans, K.J. Selmer, B.T. Breeden III, A.S. Lopatka, R.E. Plummer // Geochem. Geophys. Geosyst. – 2016. – 17. – C. 3580–3588.
16. Reference Products for Environment and Trade. URL: <https://nucleus.iaea.org/sites/ReferenceMaterials/Pages/Stable-Isotopes.aspx> (дата обращения: 15.02.2022).
17. Craig H. Isotopic variations in meteoric waters // Science. – 1961. – V. 133. – P. 1702–1703.
18. Nucleus. URL: <https://nucleus.iaea.org/wiser/index.aspx> (дата обращения: 15.02.2022).
19. Deuterium excess in marine water vapor: dependency on relative humidity and surface wind speed during evaporation / M. Benetti, G. Reverdin, C. Pierre, L. Merlivat, C. Risi, H.C. Steen-Larsen, F. Vimeux // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. – 2014. – V. 119. – P. 584–593.
20. Influence of rainfall quantity on the isotopic composition ($\delta^{18}\text{O}$ and 2H) of water in mountainous areas. Application for groundwater research in the Yunquera-Nieves karst aquifers (S Spain) / B. Andreo, C. Linan, F. Carrasco, C. Jimenez de Cisneros, F. Caballero, J. Mudry // Applied Geochemistry. – 2004. – V. 19. – P. 561–574.
21. Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation // Tellus. – 1964. – V. 16. – № 4. – P. 436–468.
22. Изотопный состав снежного покрова Байкальского региона / Ю.Н. Чиждова, Дж.Ю. Васильчук, К. Йошикава, Н.А. Буданцева, Д.Л. Голованов, О.И. Сорокина, Ю.В. Станиловская, Ю.К. Васильчук // Лед и снег. – 2015. – Т. 55. – № 3. – С. 55–66.
23. Wenninger J., Beza D.T., Uhlenbrook S. Experimental investigations of water fluxes within the soil–vegetation–atmosphere system: stable isotope mass-balance approach to partition evaporation and transpiration // Physics and Chemistry of the Earth. – 2010. – V. 35. – P. 565–570.
24. Изотопно-гидрогеохимическая характеристика радоновых вод Белокурихинского месторождения / А.А. Хвашевская, Ю.Г. Копылова, Д.А. Новиков, А.Н. Пыряев, А.А. Максимова, А.С. Деркачев, А.А. Редин // Науки о Земле и недропользование. – 2021. – Т. 44 (2). – С. 174–183.
25. Das A., Krishnaswami S., Bhattacharya S.K. Carbon isotope ratio of dissolved inorganic carbon (DIC) in rivers draining the Deccan Traps, India: sources of DIC and their magnitudes // Earth and Planetary Science Letters. – 2005. – V. 236. – Iss. 1–2. – P. 419–429.
26. Importance of the vegetation-groundwater-stream continuum to understand transformation of biogenic carbon in aquatic systems – a case study based on a pine-maize comparison in a lowland sandy watershed (Landes de Gascogne, SW France) / L. Deirmendjian, P. Anschutz, C. Morel, A. Mollier, L. Augusto, D. Loustau, L.C. Cotovicz, D. Buquet Jr., K. Lajaunie, G. Chaillou, B. Voltz, C. Charbonnier, D. Poirier, G. Abril // Science of the Total Environment. – 2019. – V. 661. – P. 613–629.
27. Изотопно-геохимические особенности проявления слаборадоновых вод «Инские источники» (юг Западной Сибири) / Д.А. Новиков, Ю.Г. Копылова, Л.Г. Вакуленко, А.Ф. Сухорукова, А.Н. Пыряев, А.А. Максимова, Ф.Ф. Дульцев, А.В. Черных // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 3 – С. 135–145.

Поступила 21.12.2021 г.

Информация об авторах

Пыряев А.Н., кандидат химических наук, научный сотрудник лаборатории изотопно-аналитической геохимии Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН; старший преподаватель кафедры химической и биологической физики Новосибирского национального исследовательского государственного университета.

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 национального исследовательского государственного университета.

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 национального исследовательского университета.

UDC 544.02(282.256.615)

STABLE ISOTOPES AS A TOOL TO CHECK THE BOUNDARIES OF CLOSED ECOSYSTEMS, BY THE EXAMPLE OF THE VITIM RIVER BASIN

Aleksandr N. Pyrayev^{1,2},
pyrayev@igm.nsc.ru

Dmitry A. Novikov^{3,1},
NovikovDA@ipgg.sbras.ru

Anastasia A. Maksimova^{1,3},
rock.nastaya64@gmail.com

¹ Institute of Geology and Mineralogy SB RAS,
3, Koptuyug avenue, Novosibirsk, 630090, Russia.

² Novosibirsk State University,
1, Pirogov street, Novosibirsk, 630090, Russia.

³ Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS,
3/6, Koptuyug avenue, Novosibirsk, 630090, Russia.

The relevance of investigation consists in revealing the influence of the environment macroscale factors on the variation of chemical and isotopic composition of large water reservoirs.

The aim of the research is to study the influence of relatively closed ecosystem changing on chemical and isotope composition (δD , $\delta^{18}O$ u $\delta^{13}C_{DIC}$) of river waters on the example of Vitim river.

Methods. Analysis of the chemical composition of waters was carried out using titration at the Basic Research Laboratory of Hydrogeochemistry at the School of Earth Sciences and Engineering of the Tomsk Polytechnic University. The δD , $\delta^{18}O$, $\delta^{13}C_{DIC}$ values of waters and dissolved inorganic carbon were determined in the Research Equipment Sharing Center at the Institute of Geology and Mineralogy SB RAS using the Isotope Ratio Mass Spectrometer Finnigan™ MAT 253, equipped with the H/Device and GasBench II.

Results. The paper introduces the data of the complex analysis of the hydrogen, oxygen and carbon isotope composition (δD , $\delta^{18}O$ and $\delta^{13}C_{DIC}$) in waters and DIC of the largest East Siberia river Vitim and some of its inflows. The δD and $\delta^{18}O$ values indicating the meteoric origin of waters vary from $-173,0$ to $-149,1$ ‰ for hydrogen and from $-23,3$ to $-20,2$ ‰ for oxygen. Local Meteoric Water Line of the region under investigation was plotted. DIC concentration in waters depends on the type of landscape and its changing. The $\delta^{13}C_{DIC}$ values vary from $-17,1$ to $-9,0$ ‰ and show that main sources of DIC were soil diffusion and biogenic CO₂. It was shown that isotope characteristic in association with the concentration characteristic of DIC in waters is an instrument very sensitive to landscape change (conventional board of the closed ecosystems).

Key words:

Vitim river, surface waters, stable oxygen, hydrogen and carbon isotopes, associated isotope and concentration characteristic of waters.

The research was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Project FSWW-0022-0014) and RFBR within the scientific project no. 18-05-70074 «Resources of the Arctic».

REFERENCES

1. Ferronsky V.I., Polyakov V.A. *Izotopiya gidrosfery* [Isotopy of the hydrosphere]. Moscow, Nauchny mir Publ., 2009. 632 p.
2. Hoefs J. *Stable isotope geochemistry*. 8th ed. Springer International Publishing AG, part of Springer Nature, 2018. 460 p.
3. Kopec B.G., Feng X., Posmentier E.S., Sonder L.J. Seasonal deuterium excess variations of precipitation at summit, Greenland, and their climatological significance. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2019, vol. 124, pp. 72–91.
4. Stefánsson A., Arnorsson S., Sveinbjörnsdóttir A.E., Heinemaier J. Isotope ($\delta D, \delta^{18}O, \delta^3H, \delta^{13}C, \delta^{14}C$) and chemical (B, Cl) constrains on water origin, mixing, water-rock interaction and age of low-temperature geothermal water. *Applied Geochemistry*, 2019, vol. 108, 104380.
5. Chafouq D., El Mandour A., Elgettafi M., Himi M., Chouikri I., Casas A. Hydrochemical and isotopic characterization of ground-water in the Ghis-Nekor plain (northern Morocco). *Journal of African Earth Sciences*, 2018, vol. 139, pp. 1–13.
6. Mickler P.J., Carlson P., Banner J.L., Breecker D.O., Stern L., Guilfoyle A. Quantifying carbon isotope disequilibrium during in-cave evolution of drip water along discrete flow paths. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2019, vol. 244, pp. 182–196.
7. Mora G., Blaser L. Effect of catchment lithology on dissolved inorganic carbon budgets in suburban streams of Baltimore, Maryland, during rainfall minima. *Geosciences Journal*, 2020, vol. 24, no. 1, pp. 85–96.
8. Novikov D.A., Pyrayev A.N., Chernykh A.V., Dultsev F.F., Ilyin A.V., Chertovskikh E.O. New data on the isotopic composition ($\delta^{13}C$, δD , $\delta^{18}O$, $^{87}Rb/^{86}Sr$ and $^{87}Sr/^{86}Sr$) of the Siberian platform brines. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 7, pp. 20–33. In Rus.
9. Newman C.P., Poulson S.R., Hanna B. Regional isotopic investigation of evaporation and water-rock interaction in mine pit lakes in Nevada, USA. *Journal of Geochemical Exploration*, 2020, vol. 210, 106445, 15 p.
10. Novikov D.A., Maksimova A.A., Pyrayev A.N., Yan P.A. First isotope-hydrogeochemical data on the natural waters of the south-east slope of the Chekanovsky ridge (Arctic areas of the Siberian platform). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 11, pp. 157–167. In Rus.
11. Novikov D.A., Maksimova A.A., Napreev D.V., Kopylova Yu.G., Khvacshvskaya A.A. Geochemical features of nature waters in the basin of the Vitim river (western regions Patom upland). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 8, pp. 7–17. In Rus.

12. Epstein S., Mayeda T. Variation of O 18 content of waters from natural sources. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1953, vol. 4 (5), pp. 213–224.
13. Nelson S.T. A simple, practical methodology for routine VSMOW/SLAP normalization of water samples analysed by continuous flow methods. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, 2000, 4, pp. 1044–1046.
14. Górka M., Sauer P.E., Lewicka-Szczebak D., Jedrysek M.-O. Carbon isotope signature of dissolved inorganic carbon (DIC) in precipitation and atmospheric CO₂. *Environmental Pollution*, 2011, vol. 159, pp. 294–301.
15. Evans M.N., Selmer K.J., Breeden III B.T., Lopatka A.S., Plummer R.E. Correction algorithm for online continuous flow $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ carbonate and cellulose stable isotope analyses. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 2016, vol. 17, pp. 3580–3588.
16. *Reference Products for Environment and Trade*. Available at: <https://nucleus.iaea.org/sites/ReferenceMaterials/Pages/Stable-Isotopes.aspx> (accessed: 15 February 2022).
17. Craig H. Isotopic variations in meteoric waters. *Science*, 1961, vol. 133, pp. 1702–1703.
18. *Nucleus*. Available at: <https://nucleus.iaea.org/wiser/index.aspx> (accessed: 15 February 2022).
19. Benetti M., Reverdin G., Pierre C., Merlivat L., Risi C., Steen-Larsen H.C., Vimeux F. Deuterium excess in marine water vapor: Dependency on relative humidity and surface wind speed during evaporation. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2014, vol. 119, pp. 584–593.
20. Andreo B., Linan C., Carrasco F., Jimenez de Cisneros C., Caballero F., Mudry J. Influence of rainfall quantity on the isotopic composition (^{18}O and ^2H) of water in mountainous areas. Application for groundwater research in the Yunquera-Nieves karst aquifers (S Spain). *Applied Geochemistry*, 2004, vol. 19, pp. 561–574.
21. Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation. *Tellus*, 1964, vol. 16, no. 4, pp. 436–468.
22. Chizhova J.N., Vasilchuk J.Y., Yoshikawa K., Budantseva N.A., Golovanov D.L., Sorokina O.I., Stanilovskaya J.V., Vasil'chuk Y.K. Isotope composition of snow cover in the Lake Baikal area. *Ice and Snow*, 2015, vol. 55 (3), pp. 55–66. In Rus.
23. Wenninger J., Beza D.T., Uhlenbrook S. Experimental investigations of water fluxes within the soil–vegetation–atmosphere system: Stable isotope mass-balance approach to partition evaporation and transpiration. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2010, vol. 35, pp. 565–570.
24. Khvashchevskaya A.A., Kopylova Yu. G., Novikov D.A., Pyrayev A.N., Maksimova A.A., Derkachev A.S., Redin A.A. Isotope-hydrogeochemical features of the Belokurikha field radon waters. *Earth sciences and subsoil use*, 2021, vol. 44 (2), pp. 174–183. In Rus.
25. Das A., Krishnaswami S., Bhattacharya S.K. Carbon isotope ratio of dissolved inorganic carbon (DIC) in rivers draining the Deccan Traps, India: sources of DIC and their magnitudes. *Earth and Planetary Science Letters*, 2005, vol. 236, pp. 419–429.
26. Deirmendjian L., Anschutz P., Morel C., Mollier A., Augusto L., Loustau D., Cotovicz L.C., Jr, Buquet D., Lajaunie K, Chaillou G, Voltz B., Charbonnier C., Poirier D., Abril G. Importance of the vegetation-groundwater-stream continuum to understand transformation of biogenic carbon in aquatic systems – a case study based on a pine-maize comparison in a lowland sandy watershed (Landes de Gascogne, SW France). *Science of the Total Environment*, 2019, vol. 661, pp. 613–629.
27. Novikov D.A., Kopylova Yu.G., Vakulenko L.G., Sukhorukova A.F., Pyrayev A.N., Maksimova A.A., Dultsev F.F., Chernykh A.V., Derkachev A.S. Isotope geochemical features of occurrence of low-radon waters «Inskie springs» (South-Western Siberia). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 3, pp. 135–145. In Rus.

Received: 21 December 2021.

Information about the authors

Aleksandr N. Pyrayev, Cand. Sc., researcher, Institute of Geology and Mineralogy of SB of RAS; senior lecturer, Novosibirsk State University.

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.

Anastasia A. Maksimova, assistant, Novosibirsk State University; junior researcher, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences.

УДК 550.837

ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРИЗНАКИ РЕКУЛЬТИВИРОВАННЫХ ОТРАБОТАННЫХ РОССЫПНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ЗОЛОТА

Осипова Полина Сергеевна¹,
OsipovaPS@ipgg.sbras.ru

Оленченко Владимир Владимирович¹,
OlenchenkoVV@ipgg.sbras.ru

Калганов Александр Сергеевич¹,
KalganovAS@ipgg.sbras.ru

Чекрыжов Андрей Васильевич¹,
ChekryzhovAV@ipgg.sbras.ru

¹ Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН,
Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3.

Актуальность исследования определяется необходимостью выявления отработанных россыпей среди целиков и оконтуривания нетронутых участков в пределах рекультивированных полигонов при поисковых и разведочных работах на россыпное золото. Задача определения таких границ на лицензионных площадях возникает, когда недропользователи, приступая к разработке месторождения, вскрывают уже перемытые рыхлые отложения, оставшиеся от хищнических отработок или неучтённой добычи прошлых лет.

Цель: определить специфические геоэлектрические признаки отработанных и неотработанных россыпей золота.

Объекты: аллювиальные россыпные месторождения золота отработанные и в естественном залегании.

Методы: электротомография, численное моделирование, полевой эксперимент.

Результаты. На основе литературных данных составлена геологическая модель аллювиальной россыпи в естественном залегании. Она включает отложения фации кос и береговых отмелей с вложенным палеоруслом и коренные породы. Модель рекультивированного полигона отличается отсутствием валунно-галечниковых отложений палеорусла. На основе геологических моделей составлены геоэлектрические модели. Отсутствие высокоомного включения в модели отработанного полигона является главным отличием от геоэлектрической модели целиковой россыпи. Численное моделирование данных электротомографии показало, что на разрезах удельного электрического сопротивления по результатам 2-D инверсии признаком целиковой россыпи является наличие локальной высокоомной аномалии от палеорусла, а в случае рекультивированного полигона – слоя в верхней части разреза, выдержанного по мощности и удельному электрическому сопротивлению. Установленные признаки выявлены при полевых исследованиях на аллювиальных россыпях Сибири и Дальнего Востока. Геоэлектрические критерии выделения целиков и отработанных россыпей являются универсальными независимо от района исследований и геологической ситуации.

Ключевые слова:

Аллювиальная россыпь, электротомография, численное моделирование, отработанный полигон, целиковая россыпь, техногенная россыпь.

Введение

Проблема выявления погребённых отработанных россыпей на лицензионных площадях нередко возникает, когда недропользователи, приступая к разработке месторождения, вскрывают уже перемытые рыхлые отложения, оставшиеся от хищнических отработок или неучтённой добычи прошлых лет. История золотодобычи на некоторых россыпных месторождениях насчитывает несколько сотен лет, такие россыпи обрабатывались многократно. Часто бывает, что документация со схемами отработки россыпи не сохранилась.

В перемытых рыхлых отложениях нередко находят значимые остаточные содержания золота. Такие россыпи называются техногенными. Например, за период с 1848 по 2018 г. из россыпей Тувы было добыто около 50 т золота [1]. При этом в разные этапы освоения россыпей на местах добычи формировались отвалы перемытых песков от мускульной, дражной и гидравлической отработки с содержанием золота до

379 мг/м³ [1]. В связи с развитием технологий добычи техногенные россыпи стали представлять интерес для повторной отработки.

В случае нерекультивированных гале-эфельных отвалов необходимость в оконтуривании отработанной россыпи не возникает. Если же в долине реки проводилась рекультивация, то при повторной отработке остро встаёт проблема определения границ перемытых отложений и целиков под планируемыми (разровненными) отвалами.

Согласно методическим рекомендациям [2, 3] при поисках и разведке россыпных месторождений геофизические методы применяют для определения мощности рыхлых отложений, расчета объемов горных работ и выбора технологии проходки выработок; изучения характера рельефа коренных пород с целью более эффективного направления поисковых и разведочных работ; картирования локальных преград (мерзлоты, таликовых зон и т. п.) для более рационального размещения горных выработок.

Для определения глубины залегания кровли коренных пород и расчленения разреза рыхлых отложений на россыпных месторождениях используют метод сейсморазведки на преломленных волнах [4]. Применение аэромагнитной съемки высокого разрешения на низком уровне от поверхности земли направлено на картирование распределения магнитных минералов в аллювиальном покрове [5].

При поисках и разведке золотоносных россыпей применяют и методы электроразведки. Для оценки мощности рыхлых отложений и определения морфологии рельефа плотика эффективным по трудозатратам является метод георадиолокации (ГРЛ) [6]. Методика ГРЛ при изучении строения массива горных пород на россыпном месторождении криолитозоны позволила определить контуры отработки дражного котлована для оценки объемов техногенных образований и обнаружить выходы скрытых скальных пород [7].

Индуктивная импульсная электроразведка по утверждению авторов [8] позволила детально расчленить разрез аллювиальных неконсолидированных отложений, выделить древние русловые врезы и локализовать участки с россыпями драгметаллов как низкоомные аномалии.

Что касается электроразведки на низкочастотном токе, то в настоящее время для поисков россыпного золота применяют электротомографию (ЭТ). Один из первых примеров выделения аллювиальных отложений на геоэлектрическом разрезе по данным ЭТ показан ещё в 1998 г. [9]. На этом же участке выполнены зондирования методом ГРЛ, которые были эффективными только в местах распространения песчано-галечниковых отложений в долине ручья и не дали информации, если в разрезе присутствовали линзы глины или ила.

Метод ЭТ в профильном варианте применен для изучения геологического строения россыпи участка

ручья Болотистого золоторудного месторождения в Хабаровском крае [10]. По данным ЭТ определены мощность и литологический состав отложений аллювия, глубина залегания коренных пород. Основным результатом исследований является выявленный слой, представленный глинисто-цементированными обломками пород, который в данной геологической ситуации является перспективным на глубинные россыпи золота.

Применение ЭТ с вызванной поляризацией (ЭТ-ВП) позволяет не только локализовать аллювиальные отложения, но и устанавливать присутствие зон золотосульфидной минерализации, которые в свою очередь являются источниками россыпной золотоносности [11]. Возможности модификации метода продемонстрированы при поисках россыпей золота в Восточных Саянах [12]. В результате исследования построена карта мощности рыхлых отложений, околонулены палеоруслу и выделены зоны золоторудной минерализации. Кроме того, отмечена необходимость создания физико-геологических моделей россыпей, характерных для изучаемых территорий. Ранее нами на основе численного моделирования и на примере полевых исследований показано, что выделяемые в поймах рек линейные аномалии высокого удельного электросопротивления соответствуют перспективным на золотоносность фациям плесов и перекатов [13].

Нам не известны публикации, где рассмотрена задача выявления отработанных россыпей среди целиков. Вероятно, ранее эта задача считалась сложной, поскольку неясны были интерпретационные критерии распознавания таких объектов. Целью настоящей работы является выявление специфических геоэлектрических признаков погребённых перемытых «песков» и «торфов», которые позволят отличать их от аллювиальных отложений в естественном залегании (целиков).

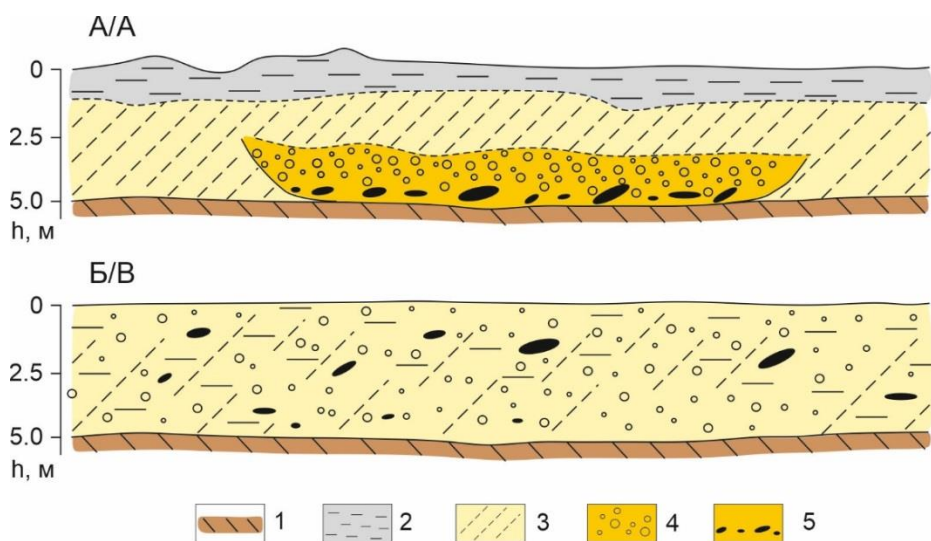


Рис. 1. Геологическая модель аллювиальной россыпи в естественном залегании (А) и рекультивированного полигона (Б): 1 – коренные породы; 2 – пойменная фация; 3 – фация кос и береговых отмелей; 4 – фация перекатов; 5 – фация плёсов; 6 – восстановленный почвенно-растительный покров

Fig. 1. Geological model of alluvial placer in natural occurrence (A) and reclaimed landfill (B): 1 – bedrock; 2 – floodplain facies; 3 – facies of bars and coastal shoals; 4 – streambed facies of riffles; 5 – streambed pool facies; 6 – restored soil-plant cover

Геологическая модель

Геологическая модель аллювиальной россыпи в естественном залегании составлена на основе литературных данных [14]. На коренных породах (плотике) залегают отложения фации кос и береговых отмелей, в которые вложено палеоруло, заполненное фацией плёсов и перекаатов (рис. 1, А).

Породы плотика могут быть разными – карбонатные, песчаники, сланцы, метаморфические и магматические породы. В большинстве случаев эти породы на контакте с аллювиальными отложениями интенсивно трещиноватые или выветрелые до состояния щебня с суглинистым заполнителем или суглинка.

Пойменная фация формируется в периоды паводков и представляет собой супесчано-суглинистый материал.

Фация кос и береговых отмелей сложена мелким и хорошо промытым песчаным материалом с правильной крупной косой слойчатостью диагонального типа.

Фация плёсов и перекаатов представляет собой валунно-галечниковые отложения. Именно эта фация богата россыпным золотом и является объектом поисков при геофизических исследованиях.

В процессе отработки россыпи гидравлическим или дражным способом на поверхности формируют гале-эфельные отвалы. При рекультивации эти отвалы разравнивают бульдозерами, в результате чего получают слой техногенных отложений смешанного фациального состава (рис. 1, Б).

Геоэлектрическая модель

Состав фаций определяет их электрические свойства. В обводнённых отложениях речной долины удельное электрическое сопротивление (УЭС) пород определяет не влажность, а гранулометрический состав. Здесь мы не учитываем влияние минерализации подземных вод на УЭС, считая, что в пределах речной долины она постоянна или изменяется незначительно. Такая зависимость УЭС от гранулометрического состава объясняется законом Арчи, который для полностью водонасыщенных сред имеет вид [15]:

$$\rho_r = a \cdot \rho_f \cdot n^{-m},$$

где ρ_r – УЭС породы; a – коэффициент извилистости пор; ρ_f – УЭС жидкости; n – пористость; m – степень цементации (1,3–1,6 для чистых песков). Степень цементации m указывает на уменьшение количества и размера пор или уменьшение количества закрытых (тупиковых) каналов. В работе [16] показано, что степень цементации m связана с геометрией пор, а не с цементацией. Для рыхлых нецементированных пород коэффициент извилистости пор a близок к 1. Так, при постоянном УЭС поровой воды ρ_f УЭС рыхлых пород ρ_r будет зависеть от их пористости, которая определяется гранулометрическим составом.

Известно, что в ряду галечник–песок–супесь–глина УЭС пород закономерно уменьшается [17]. Эта зависимость справедлива как для талых, так и для мёрзлых пород. Хорошо промытые валунно-галечниковые отложения имеют максимальное УЭС,

достигающее первых тысяч Ом·м. Песчаный и суглинистый заполнитель уменьшает УЭС валунно-галечниковых отложений, но оно по-прежнему остаётся высоким относительно УЭС пород других фаций.

Опыт наших исследований показал, что породы аллювиальных россыпей Сибири и Дальнего Востока имеют следующие электрические свойства (таблица).

УЭС песков фации кос и береговых отмелей изменяется в пределах первых сотен Ом·м и зависит от крупности песка и примеси илстых частиц.

Пойменная фация имеет самое низкое УЭС (первые десятки Ом·м), что связано с её высокой глинистостью.

Электрические свойства пород плотика также определяются их литологическим составом, степенью трещиноватости и выветрелости. УЭС карбонатных, магматических и метаморфических пород изменяется в пределах от первых сотен до первых тысяч Ом·м, а в некоторых случаях до первых десятков тысяч Ом·м. Низкое и весьма низкое УЭС (первые десятки – единицы Ом·м) наблюдается у плотиков, сложенных аргиллитами, глинистыми сланцами, особенно пиритизированной черносланцевой формации. В коре выветривания пород плотика и в зоне экзогенной трещиноватости УЭС изменяется в пределах первых десятков Ом·м.

В условиях криолитозоны УЭС аллювиальных отложений возрастает в десятки–сотни раз. Мёрзлые отложения фации плёсов и перекаатов имеют УЭС от нескольких тысяч до первых десятков тысяч Ом·м.

Таблица. Электрические свойства талых пород в пределах аллювиальных россыпей золота Сибири и Дальнего Востока

Table. Electrical properties of thawed rocks within alluvial placers of gold in Siberia and the Far East

Состав пород Rock composition		УЭС, Ом·м ER, Ohm·m
Аллювий/Alluvium		
Пойменная фация Floodplain facies	Супеси, суглинки Sandy loam, loam	18–60
Фация кос и береговых отмелей Facies of bars and coastal shoals	Песок мелкозернистый Fine sand	60–100
Фация плёсов и перекаатов Facies of riffles and pool facies	Валунно-галечниковые Boulder-pebble	300–3000
Плотик/Bedrock		
Аргиллиты, глинистые сланцы/Argillites, clay shales		1–30
Эффузивы выветрелые/Weathered effusive		70–150
Алевриты, песчаники/Siltstone, sandstone		300–500
Карбонатные породы (известняк, мергель) Carbonate rocks (limestone, marl)		300–3000
Гранитоиды трещиноватые/Fractured granitoids		500–5000
Элювий, зона экзогенной трещиноватости Eluvium, zone of exogenous fracturing		30–100

Численное моделирование

Численное моделирование данных электротомографии выполнялось с помощью программы ZondRes2D [18]. Используются следующие параметры системы наблюдений: трехэлектродная прямая и обратная установки, количество электродов – 48, шаг между электродами – 2 м.

Для инверсии модельных данных использована программа Res2Dinv [19].

В случае целиковой россыпи двумерная геоэлектрическая модель представляет собой горизонтально слоистую среду с высокоомным включением, имитирующим палеоруслу (рис. 2, А). Верхний слой – пойменная фация с УЭС 100 Ом·м, ниже залегает фация кос и береговых отмелей (300 Ом·м), внутри которой вложено высокоомное (2500 Ом·м) палеоруслу с отложениями фации плёсов и перекаатов. Плотик в модели имеет УЭС 30 Ом·м, что соответствует выветрелым породам (элювий).

Геоэлектрическая модель рекультивированного полигона (рис. 2, Б) представляет собой описанную выше трёхслойную горизонтально слоистую модель, в которой слой техногенных отложений полифациального состава имеет единое значение УЭС 300 Ом·м. Незаконномерное распределение валунов из палеоруслу в техногенном слое не приводит к существенному увеличению УЭС последнего. Отсутствие

высокоомного включения в модели погребённого отработанного полигона является главным отличием от модели целиковой россыпи. На этом и основана методика выявления отработанных россыпей по данным электротомографии.

На разрезе кажущегося сопротивления (ρ_k), полученного по результатам решения прямой задачи, в случае целиковой россыпи выделяется аномалия повышенного ρ_k от палеоруслу (рис. 2, В).

В результате решения обратной задачи восстанавливается пространственное положение палеоруслу, однако мощность фации плёсов и перекаатов завышена (рис. 2, Д).

Для модели рекультивированного полигона на разрезе ρ_k отсутствует локальная высокоомная аномалия (рис. 2, Г), а в результате инверсии с достаточной точностью восстанавливается горизонтально слоистое строение разреза (рис. 2, Е) с однородным по УЭС слоем техногенных отложений.

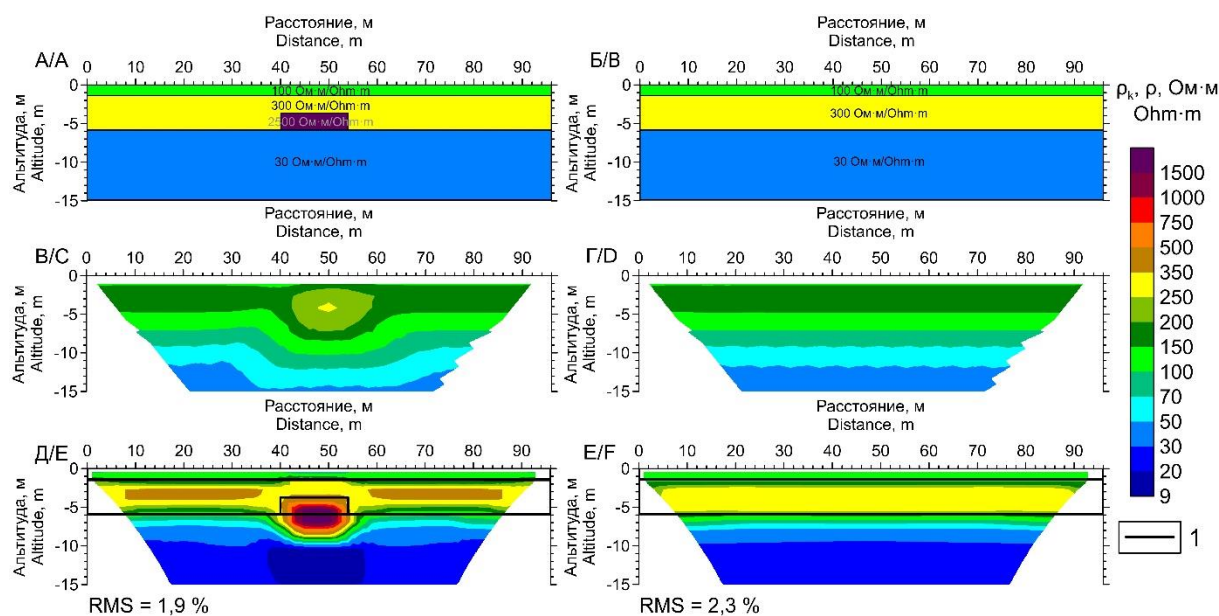


Рис. 2. Геоэлектрическая модель целиковой россыпи (А) и рекультивированного полигона (Б), разрез наблюдаемого кажущегося УЭС для модели целиковой россыпи (В) и рекультивированного полигона (Г), результат инверсии для модели целиковой россыпи (Д) и рекультивированной россыпи (Е): 1 – граница слоя в модели

Fig. 2. Geoelectric model of an original placer (A) and a reclaimed landfill (B), a section of the observed apparent resistivity for the model of a solid placer (C) and a reclaimed polygon (D), the inversion result for the model of an original placer (E) and a reclaimed placer (F): 1 – layer boundary in the model

Численное моделирование показало критерии распознавания целиковой россыпи и рекультивированного полигона отработанной россыпи по данным электротомографии. Такими критериями на разрезах УЭС по результатам 2-D инверсии являются наличие локальной высокоомной аномалии от палеоруслу в случае целиковой россыпи и однородный по УЭС слой в случае рекультивированного полигона.

Примеры полевых исследований

Полевые исследования методом электротомографии выполнялись на аллювиальных россыпях Сибири и Дальнего Востока.

Основы метода электротомографии, технологии измерений и обработки данных изложены в [20–22]. При полевых исследованиях применялась аппаратура Скала-48к12. Последовательность подключения электродов соответствовала одной из установок – Шлюмберге, дипольно-осевой, трёхэлектродной или их комбинации. Расстояние между электродами составляло 5 м.

В долине реки Горхон (Забайкалье) съемка ЭТ проведена на участках с известными границами рекультивированного полигона. В 1982–1990 гг. россыпь в долине р. Горхон детально разведана, подсчитаны и утверждены балансовые и забалансовые запа-

сы. Россыпь отработана дражным способом и частично рекультивирована. Общая мощность рыхлых отложений на реке составляла около 5 м, золотоносного пласта – 1,5 м. Коренные породы на участке представлены сланцами, гнейсами и гранитами. На геоэлектрическом разрезе по профилю через целик (рис. 3, А) в верхней части выделяется высокоомный слой (1000–15000 Ом·м) аллювия на фоне низкоомных сланцев в плотике. Перспективные для будущей отработки отложения русловой фации (целик) выделяются в интервале 180–300 м. Значения УЭС более 5000 Ом·м связаны как с литологическим составом

валунно-галечниковых отложений, так и с их мерзлым состоянием. Мощность отложений палеорула скорее всего меньше, чем толщина аномалии, как было показано ранее по результатам численного моделирования. На геоэлектрическом разрезе по профилю через рекультивированный полигон (рис. 3, Б) в интервале 190–430 м рыхлые отложения выделяются выдержанным по мощности однородным геоэлектрическим слоем с УЭС, изменяющимся в узком диапазоне от 1900 до 2300 Ом·м. Такой однородный геоэлектрический слой является признаком отработанной россыпи.

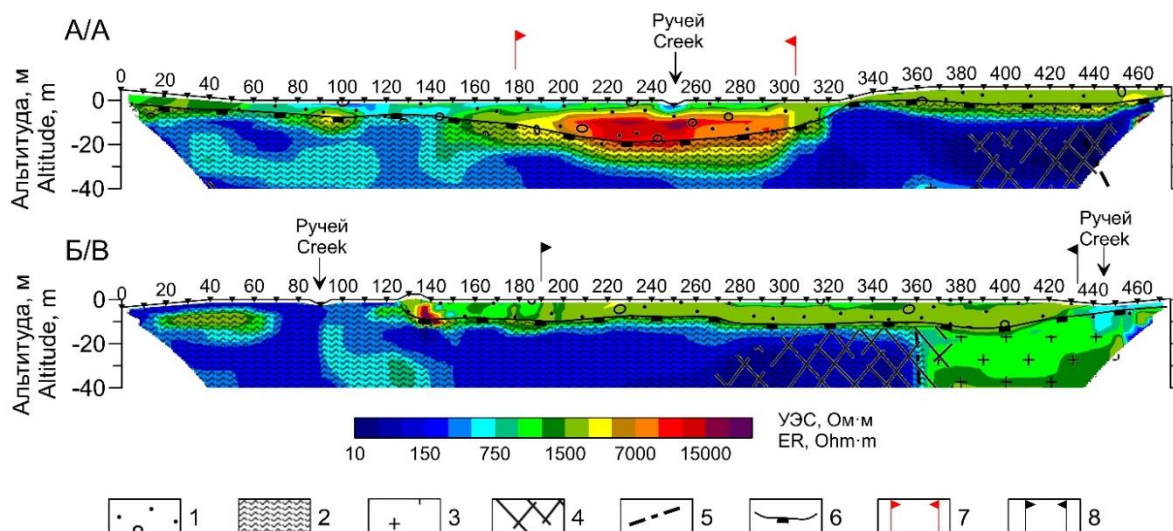


Рис. 3. Геоэлектрические разрезы долины р. Горхон через целиковую россыпь (А) и рекультивированный полигон (Б) по данным электротомографии: 1 – аллювиальные отложения; 2 – сланцы, гнейсы; 3 – граниты; 4 – трещиноватые породы; 5 – ось разлома; 6 – кровля плотика; 7 – границы русловой фации аллювия (целик); 8 – границы рекультивированного полигона

Fig 3. Valley of the river Gorkhon geoelectric sections through an original placer (A) and a reclaimed landfill (B) by electrotomography data: 1 – alluvial deposits; 2 – shales, gneisses; 3 – granites; 4 – fractured rocks; 5 – fault axis; 6 – roof of bedrock; 7 – boundaries of alluvium of streambed facie (original placer); 8 – boundaries of the reclaimed landfill

На Дальнем Востоке россыпи руч. Дегдекан эксплуатируются с 1941 г. Добыча велась, как правило, на богатых участках россыпи. В результате в долине остались целиковые участки, местоположение которых неизвестно из-за отсутствия документации. В настоящее время особый интерес для отработки представляет крупная россыпь палеоканьона. В прошлом это была узкая пойма с отвесными склонами. Ширина каньонной россыпи 10–30 м. Мощности торфов и песков сильно колеблются от 0,6 до 4,0 м и от 0,6 до 15 м соответственно. Плотик представлен сильно-трещиноватыми углистыми пиритизированными сланцами. В пределах отработанной россыпи рекультивированных полигонов нет, перемытые отложения складированы в отвалы, которые нередко навалены на целики. Опытные работы методом ЭТ проведены нами с целью определения геоэлектрических признаков нетронутых отработкой участков россыпи. На геоэлектрическом разрезе через неотработанный участок (рис. 4, А) отвалы в интервалах 10–75 м, 145–190 м имеют сопротивление 500–2000 Ом·м. В интервале 75–145 м до глубины 10 м выделены отложения рус-

ловой фации аллювия с УЭС 200–2000 Ом·м, залегающие на низкоомном плотике. На геоэлектрическом разрезе через отработанный участок (рис. 4, Б) отвал распознается по высокому сопротивлению в интервале 50–110 м. В интервале 110–140 м близко к поверхности выходят низкоомные породы плотика. Неотработанные отложения (целик) выделены в интервале 140–160 м профиля. Сопоставление разрезов показало, что нетронутая россыпь выделяется высоким УЭС. Если россыпь отработана полностью до плотика, то высокоомного слоя в верхней части разреза не наблюдается, поскольку целиковых аллювиальных отложений нет.

В Алтайском крае на территории Ануйского золотороссыпного узла разработка золотоносных россыпей на территории проводилась старателями в XVIII–IXX вв., а крупными старательскими артелями – с 1930-х гг. по настоящее время. В результате многие россыпи были выработаны и рекультивированы, но остались и нетронутые участки. ЭТ проведена с целью оценки геологического строения речных долин для планирования поисковых работ на россыпное золото. Мощность золотоносного слоя достигает 2 м,

торфов – до 3 м. Коренные породы представлены гранодиорит-порфирами, алевролитами и сланцами. Один из профилей располагался на правом берегу реки Ануй. В интервале 100–220 м он пересекал техногенный ландшафт, невыраженный в масштабе геоэлектрического разреза (рис. 5). До глубины 5 м по повышенному до 900 Ом·м на фоне 400 Ом·м УЭС выделяется русловой аллювий. В интервале 10–100 м

УЭС аллювия изменяется от 450 до 900 Ом·м в локальных областях. Между пикетами профиля 100–220 м УЭС рыхлых отложений слабо изменяется в пределах от 350 до 500 Ом·м. Таким образом, перспективные для отработки отложения долины реки в естественном залегании установлены в интервале профиля 10–100 м, а рекультивированный полигон выделен в интервале профиля 100–220 м.

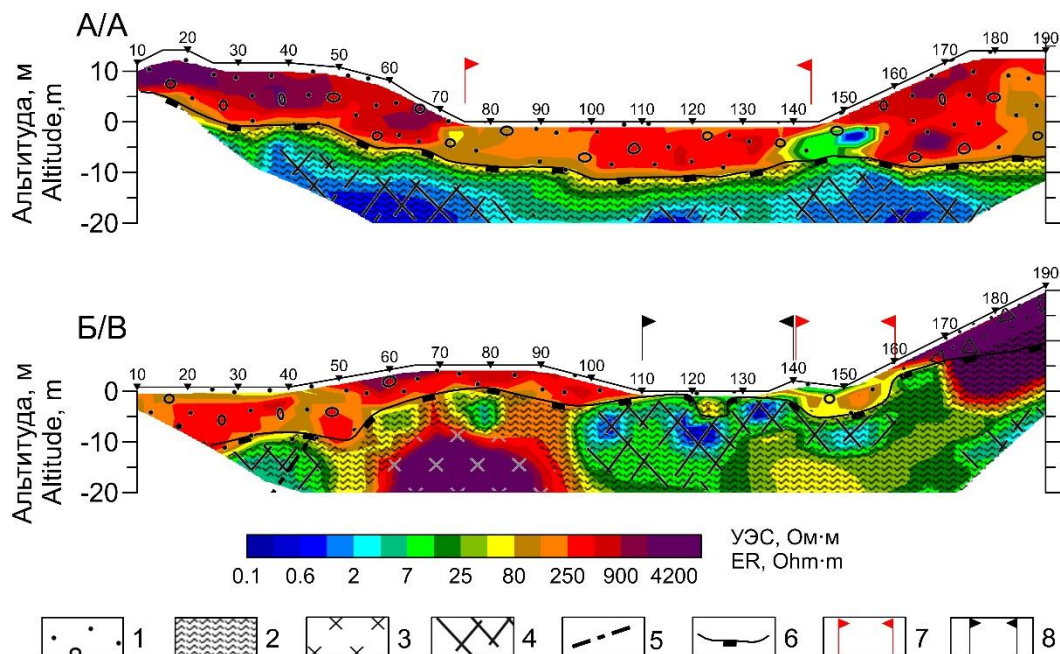


Рис. 4. Геоэлектрические разрезы долины руч. Дегдекан через целиковую россыпь (А) и отработанный участок (Б) по данным ЭТ: 1 – аллювиальные отложения; 2 – сланцы, гнейсы; 3 – порфириты; 4 – трещиноватые породы; 5 – ось разлома; 6 – кровля плотика; 7 – границы русловой фации аллювия (целик); 8 – границы отработанного полигона

Fig. 4. Valley of the creek Gvardeets geoelectric sections through an original placer (A) and a reclaimed landfill (B) by electrotomography data: 1 – alluvial deposits; 2 – shales, gneisses; 3 – porphyrites; 4 – fractured rocks; 5 – fault axis; 6 – roof of bedrock; 7 – boundaries of alluvium of streambed facies (original placer); 8 – boundaries of the reclaimed landfill

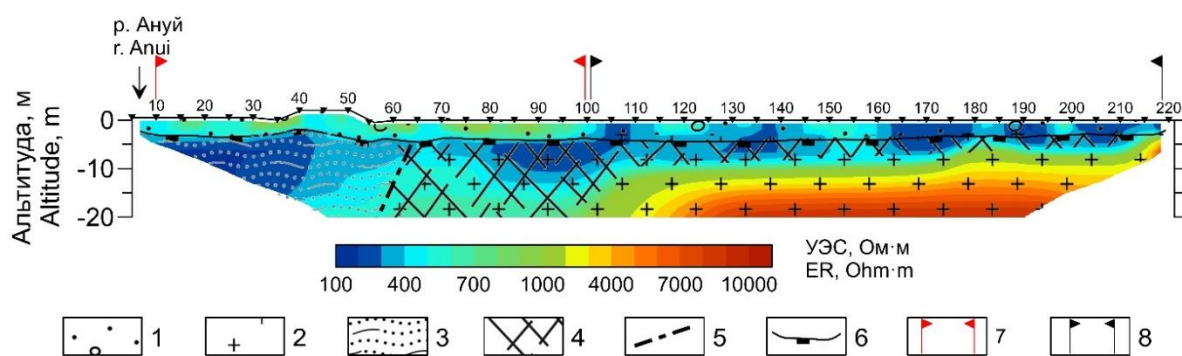


Рис. 5. Геоэлектрический разрез долины р. Ануй по данным электротомографии: 1 – аллювиальные отложения; 2 – гранодиорит-порфиры; 3 – алевролиты, сланцы; 4 – трещиноватые породы; 5 – ось разлома; 6 – кровля плотика; 7 – границы русловой фации аллювия (целик); 8 – границы рекультивированного полигона

Fig. 5. Valley of the river Anui geoelectric section by electrotomography data: 1 – alluvial deposits; 2 – granodiorite-porphyrates; 3 – silstones, shales; 4 – fractured rocks; 5 – fault axis; 6 – roof of bedrock; 7 – boundaries of alluvium of streambed facies (original placer); 8 – boundaries of the reclaimed landfill

В долине реки Воскресенка в Кемеровской области проведены исследования с целью картирования рельефа плотика. Один из профилей пересекал залеженный участок с вековыми деревьями, и только за-

росшая водоотводная канава была признаком того, что в этом месте долины реки велась добыча россыпного золота. По историческим сведениям, добыча золота на Воскресенском прииске проводилась с сере-

дины XIX в. Золотоносный пласт залегал на глубине от 1,5 до 6 м. Породы плотика представлены эффузивами. На геоэлектрическом разрезе (рис. 6) участок долины в интервале профиля 100–160 м в верхней части разреза представляет собой слой с УЭС 270–340 Ом·м.

Такой однородный геоэлектрический слой является признаком отработанной россыпи, так как ни в пределах современного русла р. Воскресенка, ни в остальной части долины не выделяются скопления высокоомных валунно-галечниковых отложений.

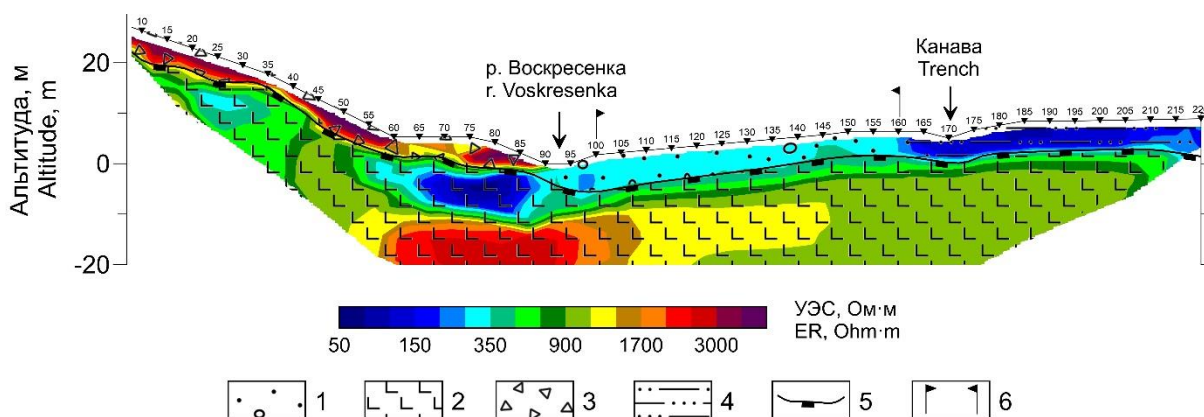


Рис. 6. Геоэлектрический разрез долины р. Воскресенка по данным электротомографии: 1 – аллювиальные отложения; 2 – эффузивные породы; 3 – делювиальные отложения; 4 – пойменные отложения; 5 – кровля плотика; 6 – границы рекультивированного полигона

Fig. 6. Valley of the river Voskresenka geoelectric section by electrotomography data: 1 – alluvial deposits; 2 – effusive rocks; 3 – diluvial deposits; 4 – floodplain deposits; 5 – roof of bedrock; 6 – boundaries of the reclaimed landfill

Анализ данных ЭТ аллювиальных россыпей показал, что рыхлые отложения рекультивированных полигонов отличаются однородностью распределения УЭС. Установлено, что целиковые (неотработанные) участки россыпей распознаются аномалиям высокого УЭС в верхней части геоэлектрического разреза. Если россыпь полностью отработана до плотика, то высокоомная аномалия в верхней части разреза отсутствует.

Независимо от района исследований и геологической ситуации геоэлектрические критерии выделения целикового руслового аллювия и рекультивированных полигонов сохраняются.

Заключение

По результатам численного моделирования и полевых исследований методом электротомографии целиковых и отработанных аллювиальных россыпей Сибири и Дальнего Востока нами установлены геоэлектрические признаки рекультивированных перемытых отложений, которые позволяют отличать их от аллювиальных отложений в естественном залегании (целики).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Прудников С.Г., Хертек Ч.М. Оценка ресурсов техногенных образований отработанных россыпей золота Кара-Чем, Проздной (Тува) // Успехи современного естествознания. – 2019. – № 2. – С. 67–72.
2. Методические рекомендации по применению Классификации запасов месторождений и прогнозных ресурсов твердых полезных ископаемых. Россыпные месторождения. – М.: Государственная комиссия по запасам полезных ископаемых, 2007. – 64 с.
3. Методика разведки россыпей золота и платиноидов / Ю.С. Будилин, Н.А. Вашко, В.А. Джобадзе, И.А. Зуев, С.С. Кальниченко, Л.П. Кашеев, А.Г. Мочалов. – М.: ЦНИГРИ, 1992. – 307 с.

Численное моделирование показало, что критерием распознавания целиковой россыпи является наличие на двумерных геоэлектрических разрезах локальной высокоомной аномалии от палеорусла. Рекультивированный полигон отработанной россыпи выделяется по выдержанному по мощности слою с однородным УЭС в верхней части разреза. На этом и основана методика выявления отработанных россыпей по данным электротомографии.

Данные полевых исследований подтверждают результаты численного моделирования. Установленные критерии остаются неизменными для разных геологических ситуаций и геокриологических условий.

Мы показали, что метод электротомографии позволяет решать задачу выявления отработанных россыпей среди целиков и нетронутых участков в пределах рекультивированных полигонов, что необходимо внедрять в практику поисковых и разведочных работ на россыпное золото. Аналогичный подход следует применять и при изучении техногенных россыпей.

Исследования выполнены при поддержке проекта Программы фундаментальных научных исследований № FWZZ-2022-0024.

4. Гайдай Н.К., Хасанов И.М. Перспективы использования сейсморазведки при поиске и разведке аллювиальных месторождений золота // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных: XIV Международная сейсмологическая школа Республики Молдова. – Обнинск, 2019. – С. 33.
5. Magnetic mapping of river channel and palaeochannel deposits-an example from Teetulpa, South Australia / C. Foss, G. Reed, T. Keeping, M. Davies // 24th International Geophysical Conference and Exhibition. – Perth, Western Australia, 2015. – P. 1–4.
6. Francke J. A review of selected ground penetrating radar applications to mineral resource evaluations // Journal of Applied Geophysics. – 2012. – V. 81. – P. 29–37.

7. Федорова Л.Л., Куляндин Г.А. Опыт применения метода георадиолокации при эксплуатационной разведке россыпных месторождений золота Якутии // Успехи современного естествознания. – 2018. – № 11. – С. 160–165.
8. Коротков Ю.В. Возможности индуктивной импульсной электроразведки в поиске и разведке россыпей золота и платиноидов // Геофизика. – 2016. – № 2. – С. 54–60.
9. Dahlin T., Owen R. Geophysical investigations of alluvial aquifers in Zimbabwe // 4th EEGS Meeting. – Spain, Barcelona, 1998. – P. 43.
10. Geophysical survey of deep alluvial gold in terms of Bolotistey Deposit / I.Y. Rasskazov, N.G. Shkabarnya, V.S. Litvintsev, G.N. Shkabarnya // Eurasian Mining. – 2017. – № 2. – P. 3–7.
11. Осипова П.С., Оленченко В.В. Электротомография с вызванной поляризацией при поисках аллювиальной россыпи золота // Инженерная и рудная геофизика: 16-я научно-практическая конференция и выставка. – Россия, Пермь, 2020. – С. 1–7.
12. Пустозеров М.Г., Тригубович Г.М. Возможности электротомографии ВП при поисках и оценке россыпей золота в Восточных Саянах // Вопросы естествознания. – 2017. – № 1. – С. 70–81.
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. Kartashov I.P. Geological features of alluvial placers // Economic Geology. – 1971. – V. 66. – № 6. – P. 879–885.
15. Oh T.M., Cho G.C., Lee C. Effect of soil mineralogy and pore-water chemistry on the electrical resistivity of saturated soils // Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. – 2014. – V. 140. – № 11. – P. 06014012.
16. Pore geometrical model for the resistivity of brine saturated rocks / E.M. Abousrafa, J.M. Somerville, S.A. Hamilton, P.W.H. Olden, B.D.G. Smart, J. Ford // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2009. – V. 65. – № 3–4. – P. 113–122.
17. Schön J.H. Physical properties of rocks: Fundamentals and principles of petrophysics. – Oxford: Elsevier, 2015. – 512 p.
18. Kaminsky A.E. ZondRes2D. Software for two-dimensional interpretation of DC resistivity and IP data. Zond Geophysical Software. – Saint-Petersburg, Russia, 2010. – 139 p.
19. Loke M.H. RES2DINV-rapid 2D resistivity and IP inversion using the least-squares method. Geotomo Software Manual. – Penang, Malaysia, 2006. – 127 p.
20. Electrical resistance tomography – theory and practice / W. Daily, A. Ramirez, A. Binley, D. LaBrecque // Near Surface Geophysics. – 2005. – № 13. – P. 525–550.
21. Electrical resistivity surveys and data interpretation / M. H. Loke, D.F. Rucker, J.E. Chambers, P.B. Wilkinson, O. Kuras // Encyclopedia of Solid Earth Geophysics. Encyclopedia of Earth Sciences Series. – Cham: Springer International Publ., 2020. – P. 1–6.
22. Instrumentation, Electrical resistivity / M.H. Loke, O. Kuras, J.E. Chambers, D.F. Rucker, P.B. Wilkinson // Encyclopedia of Solid Earth Geophysics. Encyclopedia of Earth Sciences Series. – Cham: Springer International Publ., 2020. – P. 1–7.

Поступила: 17.01.2022 г.

Информация об авторах

Осипова П.С., младший научный сотрудник Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН.

Оленченко В.В., кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН.

Калганов А.С., инженер Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН.

Чекрыжов А.В., инженер Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН.

UDC 550.837

GEOELECTRIC ATTRIBUTES OF RECLAIMED POST-MINING PLACER GOLD DEPOSITS

Polina S. Osipova¹,
OsipovaPS@ipgg.sbras.ru

Vladimir V. Olenchenko¹,
OlenchenkoVV@ipgg.sbras.ru

Aleksandr S. Kalganov¹,
KalganovAS@ipgg.sbras.ru

Andrey V. Chekryzhov¹,
ChekryzhovAV@ipgg.sbras.ru

¹ Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS,
3, Koptuyug avenue, Novosibirsk, 630090, Russia.

The relevance of the study is determined by the need to identify post-mining placers among the original and delineate untouched areas within the reclaimed landfills during prospecting and exploration for placer gold. The task of determining such boundaries in licensed areas arises when subsoil users, starting to develop a field, open up already washed loose deposits left over from predatory mining or unaccounted for production of previous years.

The aim: to determine the specific geoelectric features of post-mining and unworked gold placers.

Objects: alluvial post-mining placer gold deposits and in natural occurrence.

Methods: electrotomography, numerical simulation, field experiment.

Results. On the basis of literature data, a geological model of an alluvial placer in natural occurrence was compiled. It includes deposits of spits facies and coastal shallows with nested paleochannel and bedrock. The model of the reclaimed polygon is distinguished by the absence of boulder-pebble deposits of the paleochannel. On the basis of geological models, geoelectric models were compiled. The absence of a high-resistance inclusion in the model of the exhausted polygon is the main difference from the geoelectric model of the original placer. Numerical modeling of electrical tomography data showed that in the electrical resistivity sections, according to the results of 2-D inversion, a sign of a solid placer is the presence of a local high-resistivity anomaly from a paleochannel, and in the case of a reclaimed polygon, a layer in the upper part of the section, consistent in thickness and electrical resistivity. The established signs were revealed during field studies on alluvial placers in Siberia and the Far East. Geoelectric criteria for identifying original and post-mining placers are universal regardless of the study area and geological situation.

Key words:

Alluvial placer, electrical resistivity tomography, numerical modeling, post-mining polygon, technogenic placer.

The research was supported by the Basic Scientific Research Program no. FWZZ-2022-0024.

REFERENCES

- Prudnikov S.G., Hertek Ch.M. Assessment of resources of technogenic formations of spent gold placers Kara-Chem, Proezdnoy (Tuva). *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya*, 2019, no. 2, pp. 67–72. In Rus.
- Metodicheskie rekomendatsii po primeneniuyu Klassifikatsii zapasov mestorozhdeniy i prognoznykh resursov tverdykh poleznykh iskopaemykh. *Rossyynye mestorozhdeniya* [Methodological recommendations on the application of the Classification of reserves of deposits and predicted resources of solid minerals. Placer deposits]. Moscow, State Commission for Mineral Reserves Publ., 2007. 64 p.
- Budilin Yu.S., Vashko N.A., Dzhobadze V.A., Zuev I.A., Kalnichenko S.S., Kashheev L.P., Mochalov A.G. *Metodika razvedki rossyey zolota i platinoydov* [Methods of prospecting for placers of gold and platinoids]. Moscow, TsNIGRI Publ., 1992. 307 p.
- Gayday N.K., Khasanov I.M. Perspektivy ispolzovaniya seismo-razvedki pri poiske i razvedke allyuvialnykh mestorozhdeniy zolota [Prospects for the use of seismic in prospecting and exploration of alluvial gold deposits]. *XIV Mezhdunarodnaya seismologicheskaya shkola Respubliki Moldova. Sovremennyye metody obrabotki i interpretatsii seismologicheskikh damykh* [XIV International Seismological School of the Republic of Moldova. Modern methods of processing and interpretation of seismological data]. Obninsk, 2019. pp. 33.
- Foss C., Reed G., Keeping T., Davies M. Magnetic mapping of river channel and palaeochannel deposits-an example from Teetulpa, South Australia. *24th International Geophysical Conference and Exhibition*. Perth, Western Australia, 2015. pp. 1–4.
- Francke J. A review of selected ground penetrating radar applications to mineral resource evaluations. *Journal of Applied Geophysics*, 2012, vol. 81, pp. 29–37.
- Fedorova L.L., Kulyandin G.A. Experience of using the GPR method for operational exploration of placer gold deposits in Yakutia. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya*, 2018, no. 11, pp. 160–165. In Rus.
- Korotkov Yu.V. Possibilities of inductive pulse geoelectricians in search and investigation of gold and platinoids placers. *Geophysics*, 2016, no. 2, pp. 54–60. In Rus.
- Dahlin T., Owen R. Geophysical investigations of alluvial aquifers in Zimbabwe. *4th EEGS Meeting*. Spain, Barcelona, 1998. p. 43.
- 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, no. 2, pp. 3–7.
- Osipova P.S., Olenchenko V.V. Elektrotomografiya s vyzvannoy polarizatsiyei pri poiskakh allyuvialnoy rossypi zolota [Electrical resistivity tomography and induced polarization for alluvial gold placer prospecting]. *Inzhenernaya i rudnaya geofizika* [Engineering and Mining Geophysics 2019 16th Conference and Exhibition]. Perm, EAGE Publ. 2020. pp. 1–7.
- 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.

13. 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.
14. Kartashov I.P. Geological features of alluvial placers. *Economic Geology*, 1971, vol. 66, no. 6, pp. 879–885.
15. Oh T.M., Cho G.C., Lee C. Effect of soil mineralogy and pore-water chemistry on the electrical resistivity of saturated soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2014, vol. 140, no. 11, pp. 06014012.
16. Abousrafa E.M., Somerville J.M., Hamilton S.A., Olden P.W.H., Smart B.D.G., Ford J. Pore geometrical model for the resistivity of brine saturated rocks. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2009, vol. 65, no. 3–4, pp. 113–122.
17. Schön J.H. *Physical properties of rocks: fundamentals and principles of petrophysics*. Oxford, Elsevier Publ., 2015. 512 p.
18. Kaminsky A.E. *ZondRes2D. Software for two-dimensional interpretation of DC resistivity and IP data. Zond Geophysical Software*. Saint-Petersburg, Russia, 2010. 139 p.
19. Loke M.H. *RES2DINV-rapid 2D resistivity and IP inversion using the least-squares method. Geotomo Software Manual*. Penang, Malaysia, 2006. 127 p.
20. Daily W., Ramirez A., Binley A., LaBrecque D. Electrical resistance tomography – theory and practice. *Near Surface Geophysics*, 2005, no. 13, pp. 525–550.
21. Loke M., Rucker D.F., Chambers J.E., Wilkinson P.B., Kuras O. Electrical resistivity surveys and data interpretation. *Solid Earth Geophysics Encyclopedia. 2nd ed. «Electrical & Electromagnetic»*. Cham, Springer International Publ., 2020. pp. 1–6.
22. Loke M.H., Kuras O., Chambers J.E., Rucker D.F., Wilkinson P.B. Instrumentation, electrical resistivity. *Solid Earth Geophysics Encyclopedia. 2nd ed. «Electrical & Electromagnetic»*. Cham, Springer International Publ., 2020. pp. 1–7.

Received: 17 January 2022.

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.

Aleksandr S. Kalganov, engineer, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS.

Andrey V. Chekryzhov, engineer, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS.

УДК 66.074.2/.3:66.067.3

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕХАНИЗМА ОЧИСТКИ ГАЗОВ ОТ АЭРОЗОЛЕЙ МАСЛА ФИЛЬТРАМИ ИЗ МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Хабибуллин Марат Яхиевич,
m-hab@mail.ru

Уфимский государственный нефтяной технический университет (филиал в г. Октябрьский),
Россия, 452607, г. Октябрьский, ул. Девоновская, 54-а.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью увеличения объемов проведения различных технологических процессов, связанных с эффективной очисткой газов в керамических фильтрах. Наиболее перспективной альтернативой рукавным фильтрам для очистки от пыли высокотемпературных газов являются фильтры с элементами из пористых проницаемых керамических материалов.

Цель: разработать и предложить схему лабораторной установки для изучения данного процесса путем использования фильтров с порами больших размеров в диапазоне исследуемых параметров за счет получения эффекта генерации «вторичных» аэрозолей и наблюдения на границе коэффициента проскока с увеличением скорости фильтрования и размера частиц.

Объекты. Исследованиям подвергались однослойные фильтрующие элементы – пористые цилиндры, двухслойные фильтрующие элементы, комбинированный фильтрующий элемент, который изготовляли нанесением на однослойный элемент из порошка с частицами размером 45 мкм слоя порошка с более крупными частицами (180 мкм). Комбинированный фильтрующий элемент состоял из двух элементов: наружного однослойного (размер частиц 180 мкм, внутренний диаметр 0,052 м, толщина стенки 0,004 м) и вставленного в него коаксиально двухслойного. Исследовали осаждение аэрозолей трансформаторного масла, получаемых распылением в специальном генераторе тумана. Дисперсный состав и концентрацию аэрозолей до и после фильтра определяли пятиступенчатым каскадным импактором.

Методы. Лабораторные исследования проводились согласно предложенным методам по эффективной очистке газов в керамических фильтрах при температуре 600 °С и более. Однако дальнейшее развитие этих исследований сдерживалось отсутствием достаточно экономичных отечественных керамических пористых фильтровальных элементов. Наиболее перспективной альтернативой рукавным фильтрам для очистки от пыли высокотемпературных газов являются фильтры, фильтрующий элемент которых изготовлен из пористых проницаемых керамических материалов, представляющих собой особый вид керамики, выполненной специальными технологическими приемами с повышенной пористостью и с соответствующими размерами и формами пор. В процессе проведения испытаний фиксировали: гидравлическое сопротивление образца, температуру и расход воздуха, концентрацию и размеры капель до и после фильтра. Технология создания пористых проницаемых керамических материалов из порошков заключается в следующем: получение узко фракционированного порошка-наполнителя (электрокорунд, дистен-силлиманит), подбор технологической связки (глина) и временной связки (поливиниловый спирт), смешивание компонентов в определенном соотношении, прессование (удельное давление 30 МПа), сушка (при 150–150 °С) и обжиг (при 1200–1300 °С) образцов. Технология создания пористых проницаемых керамических материалов из волокон заключается в следующем: получение водной суспензии силикатных волокон определенной длины (1–5 мм), формование образцов методом шликерного литья, сушка и обжиг. На ряд пористых образцов из порошков нанесена мембрана с целью создания образцов с малым размером пор и оценки их свойств.

Результаты исследования взаимосвязи гидравлического сопротивления Δp фильтрующих элементов со скоростью движения потока капельной смеси газа анализировали в критериальной форме в целях исключения влияния индивидуальных особенностей образцов и условий испытания. Установлен эффект генерации «вторичных» аэрозолей и подтвержден обработкой результатов. Эффективность фильтрования двухслойными и комбинированными фильтрами достигает 99,96 %. Полученные результаты исследования свидетельствуют о целесообразности использования в промышленных аппаратах керамических фильтровальных элементов.

Ключевые слова:

Улавливание, однослойный, двухслойные, комбинированный, фильтрующий элемент.

Введение

В настоящее время в газовой промышленности возросли требования к качеству подготовки углеродородных газов для их дальнейшей транспортировки и переработки, что обусловило необходимость поиска новых технических решений по более глубокой очистке и осушке газа от капельной жидкости и паров воды путем создания высокоэффективных фильтров для улавливания субмикронных частиц высококонцентрированных туманов [1].

Существуют типы фильтров с зернистыми многослойными металлокерамическими материалами, способными улавливать частицы жидкостей с очищающей способностью до 99,9 % и размером частиц 0,05...0,90 мкм [2].

Как правило, такие фильтры изготавливаются из зернистых смачиваемых материалов: сталь коррозионностойкая, никель, карбид кремния и оксид алюминия. Такие фильтры состоят из селективного тонкодисперсного материала, наносимого на грубодисперсную армирующую сетку, и его структура, согласно кристаллической решетке материала, анизотропная [3].

Опыт применения по очистке и осушке газа от капельной жидкости и паров в мире показывает, что керамические фильтры достигают высокой эффективности очистки газов с температурой, превышающей 400 °С, в то время как температура применения синтетических тканей не превышает 250 °С, стеклотканей – 300 °С [4].

Методология

Лабораторные исследования, проведенные в Институте нефти и газа Уфимского государственного нефтяного технического университета (филиал в г. Октябрьский) (ИНИГ УГНТУ), подтвердили возможность эффективной очистки газов в керамических фильтрах при температуре 600 °С и более [5]. Однако дальнейшее развитие этих исследований сдерживалось отсутствием достаточно экономичных отечественных керамических пористых фильтровальных элементов. Наиболее перспективной альтернативой рукавным фильтрам для очистки от пыли высокотемпературных газов являются фильтры, фильтрующий элемент которых изготовлен из пористых проницаемых керамических материалов [6], представляющих собой особый вид керамики, выполненной специальными технологическими приемами с повышенной пористостью и с соответствующими размерами и формами пор [7].

В процессе проведения испытаний записывали результаты: гидравлического сопротивления образца, температуры и расхода воздуха, концентрации и размеров капель до и после фильтра.

Состав капель тумана на входе в фильтрующий элемент определенной конструкции, выполненный в ИНИГ УГНТУ (филиал в г. Октябрьский) [7], имеет следующие параметры: диаметр капель $d_m=1,3$ мкм, среднее логарифмическое стандартное отклонение функции распределения капель по размерам $\lg\sigma_k=0,23$, величина плотности капли $\rho_k=885$ кг/м³. Концентрация капель на входе в фильтр менялась в диапазоне 500–1000 мг/м³.

Технология изготовления пористых проницаемых керамических материалов из порошков заключается в следующем: получение узко фракционированного порошка-наполнителя (электрокорунд, дистен-силлиманит), подбор технологической связки (глина) и временной связки (поливиниловый спирт), смешивание компонентов в определенном соотношении, прессование (удельное давление 30 МПа), сушка (при 150–150 °С) и обжиг (при 1200–1300 °С) образцов.

Технология получения пористых проницаемых керамических материалов из волокон заключается в получении водной суспензии силикатных волокон определенной длины (1–5 мм), формовании образцов методом шликерного литья, сушке и обжиге.

На ряд пористых образцов из порошков нанесена мембрана с целью создания образцов с малым размером пор и оценки их свойств.

В табл. 1 приведены физико-технические характеристики образцов, а в табл. 2 – результаты их исследований из работы [8]. Эффективность улавливания капель η определялась при скорости фильтрации 3 см/с.

Экспериментальные исследования показали, что фракционная эффективность волокнистого фильтра, работающего в низкоскоростном режиме (как и в высокоскоростном), подчиняется нормально-логарифмическому закону. Это позволяет принять для эффективности получения результатов расчетов по фракционной эффективности волокнистых филь-

тров, работающих в низкоскоростном (диффузионном) режиме, вероятностный метод, который используется при расчете высокоскоростных (инерционных) фильтров [9].

Необходимое в этом случае значение d_{50} (диаметр капель, улавливаемых фильтром с эффективностью, равной 0,5 мкм) может быть выражено в виде зависимости, представленной по формуле (1):

$$d_{50} = 0,475 - 0,694F, \quad (1)$$

где F – функция, характеризующая фракционную эффективность улавливания капель в диффузионном режиме фильтрации, представленная в выражении (2):

$$F = \left[\frac{\alpha H}{\pi d_b} \left(2,002 - \ln \frac{d_b v_r \rho_r}{\mu} \right)^{-1/3} \left(\frac{C_k K_B T_r}{3\pi \mu d_m v_r d_b} \right)^{2/3} \right], \quad (2)$$

где d_{50} – диаметр капель, улавливаемых фильтром с эффективностью, равной 0,5 мкм; $\alpha=(1-\varepsilon)$ – коэффициент плотности упаковки; H – толщина фильтровального слоя, м; ε – пористость фильтровального материала, м³/м³; d_b – диаметр волокон в фильтре, м; v_r – значение скорости газового потока, м/с; ρ_r – значение плотности газового потока, кг/м³; μ – вязкость динамическая газов, Па·с; C_k – коэффициент Кенингема–Милликена; K_B – постоянная Больцмана (1,38⁻²³ Дж/К); T_r – абсолютная температура газов, К; d_m – медианный диаметр капель, относительно которого рассчитывается величина C_k , м.

В рассматриваемом случае за диаметр d_b принимается средний диаметр зерна d_3 , м. Величину d_{50} определяли из выражения в работе [10] в виде (3):

$$x = \frac{\lg \left(\frac{d_m}{d_{50}} \right)}{\sqrt{\lg^2 \sigma_\eta + \lg^2 \sigma_k}}, \quad (3)$$

где x – аргумент функции $\Phi(x)=\eta$ (определяется из таблицы работы [11]); $\lg\sigma_\eta$ – величина стандартного логарифмического отклонения функции распределения взвешенных частиц с учетом фракционной эффективности каплеуловителя (при расчетах значение $\lg\sigma_\eta=1,2$ соответствует значению $\lg\sigma_\eta$ волокнистых фильтров с низкой скоростью очистки).

Обобщение экспериментальных данных показывает, что значения d_{50} для образцов керамических фильтров с $d_3 < 50$ мкм достаточно хорошо определяются и составляют в среднем 0,23 мкм. Величины d_{50} для образцов с $d_3 < 50$ мкм (образцы № 3 и 4) составляют от 1 до 2 мкм и характеризуются низкой эффективностью улавливания капель ($\eta \approx 0,3 \dots 0,5$).

Очистку газов на выходе из поршневых и винтовых маслозаполненных агрегатов, например воздушных и гелиевых компрессоров, проводят в зависимости от требуемой степени очистки различными способами [12–16].

Исследована возможность тонкой очистки газов от аэрозолей масла (средний размер частиц ~1 мкм) металлокерамическими фильтрами. Содержание аэрозолей в сжатом газе не должно превышать 0,01 мг/м³. Эти фильтры легко поддаются механической обра-

ботке и сварке; могут быть регенерированы обратным потоком газа или химического растворителя, а также прокаливанием; имеют относительно высокую механическую прочность; однородны по структуре; выдерживают высокие температуры. Однако недостаток данных о фракционной эффективности улавливания аэрозолей масел в металлокерамических фильтрах [17–21] затрудняет расчет, проектирование и использование их в системах очистки компрессоров.

Исследуемые однослойные фильтрующие элементы – пористые цилиндры (внутренний диаметр 0,034 м, наружный 0,04 м, длина ~0,1 м) – устанавливали в

цилиндрической камере (диаметр 0,1 м) так, чтобы один торец элемента был заглушен, а другой имел в центре отверстие для подвода газа. Двухслойные фильтрующие элементы изготавливали нанесением на однослойный элемент из порошка с частицами размером 45 мкм слоя порошка с более крупными частицами (180 мкм). Комбинированный фильтрующий элемент состоял из двух элементов: наружного однослойного (размер частиц 180 мкм, внутренний диаметр 0,052 м, толщина стенки 0,004 м) и вставленного в него коаксиально двухслойного [22–26]. Характеристики исследуемых элементов приведены в табл. 1.

Таблица 1. Характеристика исследуемых фильтрующих элементов

Table 1. Characteristics of the investigated filter elements

Номер образца фильтрующего элемента Number of filter element sample	Тип фильтрующего элемента Filter element type	Материал Material	Размер, мкм Size, microns		Производительность по воздуху (при $\Delta p=5,9$ кПа), м ³ /с Air capacity (at $\Delta p=5,9$ kPa), m ³ /s
			частиц порошка powder particles	пор (средний) pore (average)	
1	Однослойный Single layer	Сплав H60M20 Alloy H60M20	63	24	$2,25 \cdot 10^{-3}$
2			40	14	$1,13 \cdot 10^{-3}$
3		Титан Titanium	45	7	$0,78 \cdot 10^{-3}$
4		Бронза ПРБ Bronze PWB	40	12	$0,15 \cdot 10^{-3}$
5	Двухслойный Double layer	Титан Titanium	45; 180		Не определяли Not determined
6	Комбинированный Combined		180; 45; 180		

Исследовали осаждение аэрозолей трансформаторного масла, получаемых распылением в специальном генераторе тумана. Дисперсный состав и концентрацию аэрозолей до и после фильтра определяли пятиступенчатым каскадным импактором [27–31]. Расчетные значения медианного размера d_{50} частиц, осаждаемых на ступенях импактора при постоянном расходе газа через него (20 л/мин), приведены в табл. 2.

Таблица 2. Расчетные значения медианного размера d_{50} частиц

Table 2. Calculated values of the median size of d_{50} particles

Расчетные данные/Estimated data					
Ступень/Step	I	II	III	IV	V
d_{50} , мкм/ μm	8	5,23	2,85	1,85	1

Статистическое распределение аэрозольных частиц после генератора тумана подчинялось нормальному логарифмическому закону. Величина среднего размера частиц по диаметру составлял $d_{50}=3,9$ мкм. Среднее квадратическое отклонение от функции распределения размера аэрозольных частиц $\lg\Delta=0,326$. Концентрация аэрозолей перед фильтром была постоянной ($3,8$ г/м³).

Пробы перед фильтром отбирали изокинетично, а после фильтра – неизокинетично (параметр неизокинетичности 0,5...2,0). Однако, как показал расчет [6], погрешность измерения концентрации частиц размером 10 мкм не превышала 9,5 %. Концентрация аэрозольных частиц, измеренная импактором, отличалась от концентрации, измеренной балансным методом с помощью абсолютных фильтров, не более чем на 30 % [32–38].

Обсуждение

Результаты исследования взаимосвязи гидравлического сопротивления Δp фильтрующих элементов со скоростью движения потока капельной смеси газа анализировали в критериальной форме в целях исключения влияния индивидуальных особенностей образцов и условий испытания [39–41].

Обработка экспериментальных данных по гидравлическому сопротивлению сухих фильтровальных перегородок, изготовленных из различных материалов (металлической проволоки, монель-металла, полипропиленовых и лавсановых волокон и др.), проводилась на основании анализа классических уравнений гидродинамики, используемых для определения величины проницаемости газов через пористые перегородки. Для расчета гидравлического сопротивления волокнистых фильтров в тех случаях, когда течение не является ламинарным и необходимо учитывать инерционные потери, было предложено уравнение (4):

$$\Delta p = \zeta \frac{\vartheta_r^2 \rho_r H \alpha}{\varepsilon^2 \pi d_b}, \quad (4)$$

где Δp – гидравлическое сопротивление сухого фильтра, МПа; ζ – коэффициент гидравлического сопротивления сухого фильтра; ϑ_r – скорость газового потока, м/с; ρ_r – плотность газа, кг/м³; H – глубина фильтрующего слоя, м; α – относительная плотность фильтрующей среды; ε – пористость; d_b – диаметр волокон, м.

Уравнение (4) отражает квадратичную зависимость гидравлического сопротивления фильтра от скорости газа, что характерно для турбулентного

(скоростного) движения газового потока, а коэффициент гидравлического сопротивления ζ должен учитывать взаимное расположение волокон в фильтре.

Коэффициент ζ , характеризующий гидравлическое сопротивление перегородок, решеток и других препятствий на пути движения газового потока, находится в зависимости от критерия Re до определенного критического значения $Re_{кр}$, после которого (с увеличением скорости газового потока) наступает автомодельный режим, и величина ζ сохраняет практически постоянное, независимое от Re значение.

Исследования показали, что при скорости газового потока >3 м/с ($Re > 8$) величина ζ колеблется в пределах от 3 до 6. При $Re < 5$ значения резко возрастают [42, 43].

На основе экспериментальных данных были рассчитаны безразмерные критерии Эйлера Eu и Рейнольдса Re . Как видно из рис. 1, во всем диапазоне исследованных скоростей сопротивление (Eu) газовому потоку у фильтров из титана выше, чем у фильтров из бронзы и сплава H60M20. Функция $Eu=f(Re)$ близка к линейной, т. е. соответствует закону Дарси для проницаемых тел и может быть описана уравнением.

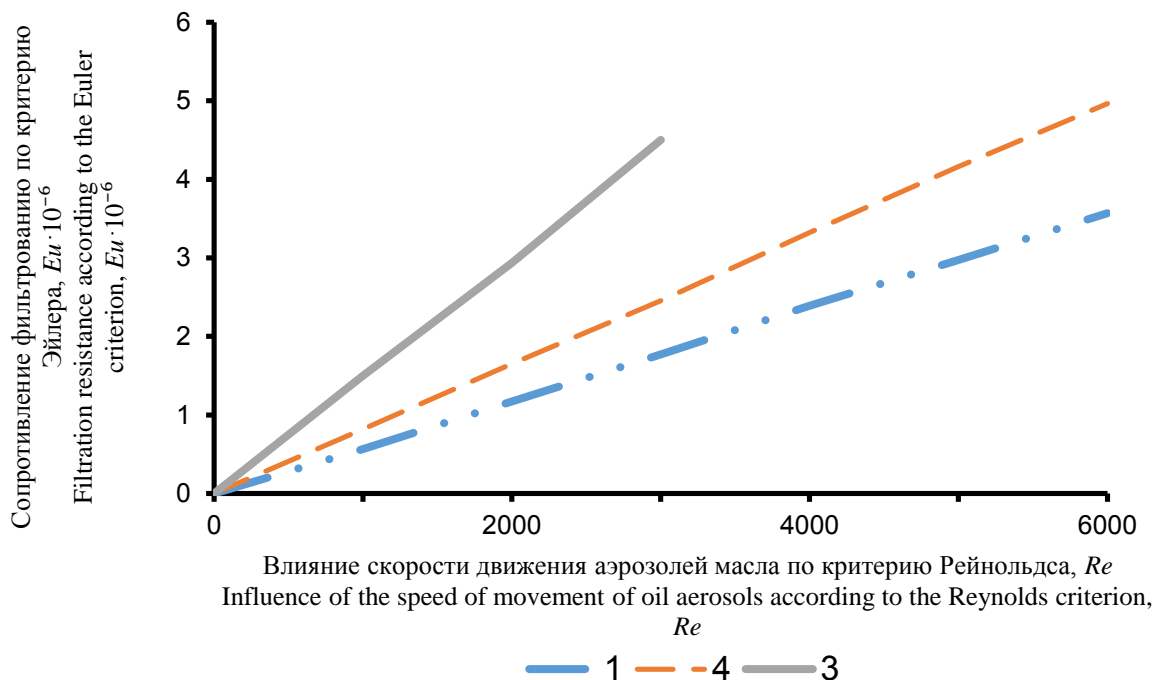


Рис. 1. Влияние скорости движения (Re) аэрозолей масла на сопротивление (Eu) фильтрованию (номера прямых соответствуют номерам фильтрующих элементов в табл. 1)

Fig. 1. Influence of the speed of movement (Re) of oil aerosols on the resistance (Eu) to filtration (the numbers of the straight lines correspond to the numbers of the filter elements in Table 1)

Рост гидравлического сопротивления Δp фильтра с увеличением продолжительности его работы (рис. 2) объясняется, с одной стороны, уменьшением живого сечения каналов в результате образования на их стенках пленки масла, а с другой – образованием пузырей в выталкиваемой жидкости при выходе газа из фильтра и дополнительным гидравлическим сопротивлением Δp_σ , связанным с преодолением сил поверхностного натяжения σ . Полное гидравлическое сопротивление Δp на элементе складывается из сопротивления Δp_σ «сухого» (не замасленного) элемента и Δp_σ , рассчитываемого из источника [44] по формуле (5):

$$\Delta p_\sigma = \beta 4\sigma / d_o, \quad (5)$$

где $\beta=0,8 \dots 1,0$ – коэффициент; σ – силы поверхностного натяжения, н/м; d_o – средний размер пор, м.

Результаты расчета по этой формуле хорошо согласуются с данными эксперимента. Следует отметить, что подобный рост гидравлического сопротивления газовому потоку Δp_σ с учетом преодоления сил поверхностного натяжения наблюдается и на

сетчатых барабанных решетках [45]. Для оценки фильтрующей способности элементов был принят коэффициент проскока частиц аэрозолей, определяемый как отношение массовых концентраций аэрозолей на выходе и входе фильтра в зависимости от скорости газа и размера аэрозольных частиц. Сложный характер этой зависимости (рис. 3) для элемента № 1 (табл. 1) обусловлен сложным характером процесса улавливания аэрозолей (инерционный, диффузионный, касания и т. п.) и генерацией «вторичных» аэрозолей в результате разрыва (дробления) масляных пленок в пузырях.

При использовании фильтров с порами больших размеров в диапазоне исследуемых параметров эффект генерации «вторичных» аэрозолей отсутствует и на границе наблюдается постепенное уменьшение коэффициента проскока с увеличением скорости фильтрования и размера частиц (рис. 3).

Из исследованных однослойных фильтрующих элементов наиболее эффективны элементы № 1 и 2 из сплава H60M20 (табл. 3).

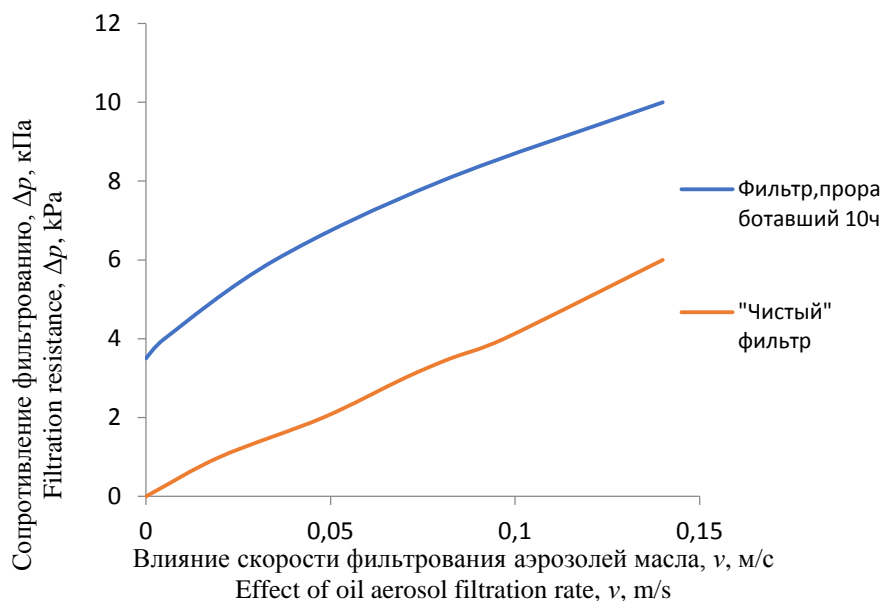


Рис. 2. Влияние скорости фильтрования v аэрозолей масла на сопротивление фильтрованию Δp в зависимости от продолжительности работы фильтра из сплава Н60М20: — «чистый» фильтр; — фильтр, проработавший 10 ч

Fig. 2. Influence of the filtration rate v of oil aerosols on the filtration resistance Δp depending on the duration of the filter from the alloy Н60М20: — «clean» filter; — filter that worked for 10 hours

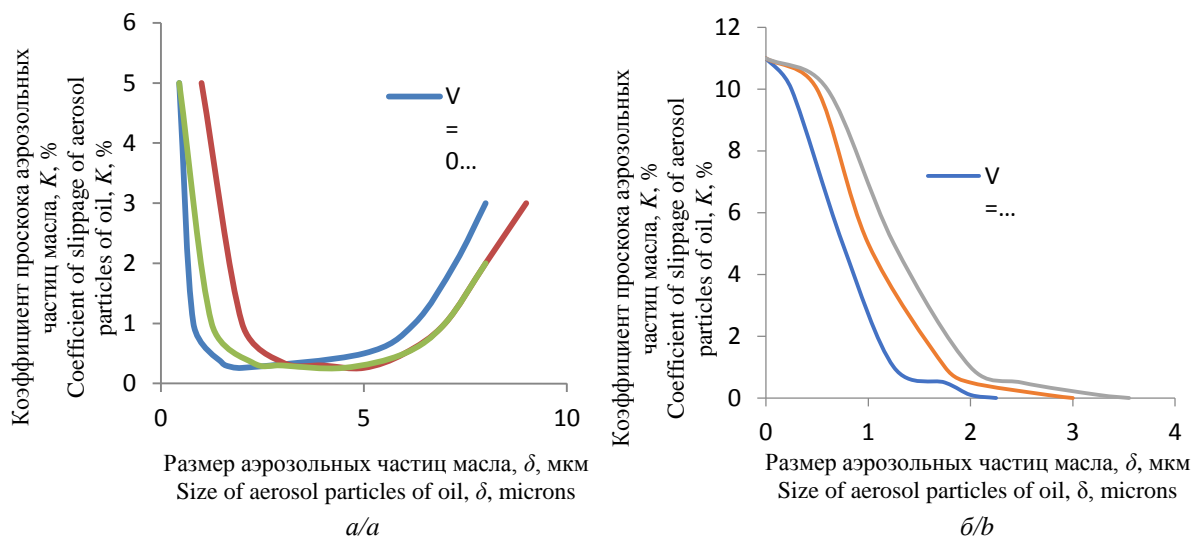


Рис. 3. Зависимость коэффициента проскока K аэрозольных частиц масла от их размера δ при разной скорости фильтрования V (м/с) через фильтрующие элементы из сплава Н60М20: а, б) соответственно элементы № 1 и 2 (табл. 1)

Fig. 3. Dependence coefficient of slippage of aerosol particles of oil K of aerosol oil particles on their size δ at different filtration rates V (м/с) through filtering elements made of alloy Н60М20: а, б) elements no. 1, 2, respectively (Table 1)

Таблица 3. Результаты исследования однослойных фильтрующих элементов

Table 3. Results of research of single-layer filter elements

Номер образца фильтра (табл. 1) Filter sample number (Table 1)	Оптимальная скорость фильтрования, м/с Optimal filtration speed, m/s	Коэффициент проскока (%) аэрозольных частиц с размером, мкм Coefficient of slippage (%) of aerosol particle size, μm						Эффективность фильтрования, % Filtration efficiency, %
		Более 8 More than 8	8,0...5,23	5,23...2,85	2,85...1,85	1,85...1,00	Менее 1 Less than 1	
1	0,143	0,0	0,0	0,03	0,55	1,68	11,7	99,26
2	0,04	2,18	0,4	0,24	0,16	1,14	5	99,13
3	0,02	2,92	1,6	0,16	0,35	0,32	0,1	98,57
4	0,025	9,74	8,02	4,69	1,45	0,81	1,08	96,04
5	0,133	5,91	0,37	0,17	0,08	0,23	0,02	99,15
6	0,02	0,26	0,0	0,0	0,0	0,0	0,14	99,96

Выводы

Результаты исследования взаимосвязи гидравлического сопротивления Δp фильтрующих элементов со скоростью движения потока капельной смеси газа анализировали в критериальной форме в целях исключения влияния индивидуальных особенностей образцов и условий испытания. В процессе исследования установлен эффект генерации «вторичных» аэрозолей, что подтверждается обработкой результатов. Процесс осаждения инерционным механизмом вполне эффективно происходит за счет диффузионных процессов переноса. Обобщение экспериментальных данных (рис. 2) показывает, что значения d_{50}

для образцов керамических фильтров со средним диаметром зерен (равным диаметру волокон фильтра) $d_3 < 50$ мкм достаточно хорошо определяются и составляют в среднем 0,23 мкм. Величины d_{50} для образцов $d_3 > 50$ мкм (образцы № 3 и 4) составляют от 1 до 2 мкм и характеризуются низкой эффективностью улавливания капель ($\eta \approx 0,3-0$). Результаты исследования свидетельствуют о целесообразности использования в промышленных аппаратах керамических фильтрованных элементов с $d_3 \leq 50$ мкм. Эффективность фильтрования двухслойными и комбинированными фильтрами достигает 99,96 % (элемент № 6).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Improved design of two-stage filter cartridges for high sulfur natural gas purification / Z. Liu, Z. Ji, J. Shang, H. Chen, Y. Liu, R. Wang // *Separation and Purification Technology*. – 2018. – V. 198. – P. 155–162.
2. Filtration of aerosol particles by cylindrical fibers within a parallel and staggered array / Z. Liu, Z. Ji, J. Shang, H. Chen, Y. Liu, R. Wang // *Microsystem Technologies*. – 2016. – V. 22 (5). – P. 965–977.
3. Хабибуллин М.Я., Сулейманов Р.И. Повышение надежности сварных соединений трубопроводов в системе поддержания пластового давления // *Нефтегазовое дело*. – 2019. – Т. 17. – № 5. – С. 93–98. DOI: 10.17122/ngdelo-2019-5-93-98
4. Guo B., Ghalambor A. *Natural gas engineering handbook*. 2nd ed. – Houston, Texas: Gulf Publishing Company, 2012. – 472 p.
5. Permeability of filter cartridges used for natural gas filtration at high pressure / Cheng Chang, Zhongli Ji, Liu Chuanbin, Zhao Fengting // *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. – 2016. – V. 34. – P. 419–427.
6. Mehdi A., Mohebbi A., Fabrizio S. Experimental study of filtration system performance of natural gas in urban transmission and distribution network: a case study on the city of Kerman // *Iran. Fuel*. – 2011. – V. 90. – № 3. – P. 11661171.
7. Mokhatab S., Poe W. *Handbook of natural gas transmission and processing*. 2nd ed. – USA, Kidlington, Oxford: Elsevier Inc., 2012. – 802 p.
8. Петров Д.В., Матросов И.И. Рамановский газоанализатор (РГА): измерения природного газа // *Прикладная спектроскопия*. – 2016. – Т. 70. – № 10. – С. 1770–1776.
9. Шурайц А.Л. Выявление величины запаса падения давления на фильтрующем элементе // *Проблемы и методы обеспечения надежности и безопасности систем транспорта нефти, нефтепродуктов и газа: материалы международного форума*. – Уфа, 2012. – С. 360–362.
10. Хабибуллин М.Я. Повышение долговечности и надежности работы центробежных сепараторов путем применения новых материалов // *Нефтегазовое дело*. – 2020. – Т. 18. – № 3. – С. 107–112. DOI: 10.17122/ngdelo-2020-3-107-112
11. Усачев А.П. Основные принципы устройства и функционирования газовых цилиндрических фильтрующих устройств высокой пропускной способности // *Региональная архитектура и строительство*. – 2018. – № 1. – С. 141–147.
12. Шурайц А.Л., Густов С.В., Недлин М.С. Фильтры предварительной очистки – слабое звено в общей цепи обеспечения безопасности газорегуляторных пунктов высокой пропускной способности // *Проблемы и методы обеспечения надежности и безопасности систем транспорта нефти, нефтепродуктов и газа: материалы науч.-практ. конф.* – Уфа, 2014. – С. 435–437.
13. Model-based information fusion investigation on fault isolation of subsea systems considering the interaction among subsystems and sensors / G. Song, P.S. Rossi, F. Khan, N. Paltrinieri, A. Bahoo Toroody // *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. – 2020. – V. 67. – P. 104267. DOI: 10.1016/j.jlp.2020.104267.
14. Хабибуллин М.Я. Исследование процессов, происходящих в колонне труб при устьевой импульсной закачке жидкости в скважину // *Нефтегазовое дело*. – 2018. – Т. 16. – № 6. – С. 34–39. DOI: 10.17122/ngdelo-2018-6-34-39
15. Усачев А.П. Разработка математической модели по обоснованию типа системы грубой очистки природного газа от твердых частиц и оптимизации ее геометрических и эксплуатационных параметров // *Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов*. – 2011. – № 1 (83). – С. 148–158.
16. Thomas D. *Aerosol Filtration*. – Oxford: Elsevier, 2016. – 218 p.
17. Bell C.G., Strauss W. Effectiveness of vertical mist eliminators in a cross flow-scrubber // *Journal of the Air Pollution Control Association*. – 1973. – V. 23. – № 11. – P. 967–969.
18. Billings C.E. Fabric filter installations for flue gas fly ash control // *Powder Technology*. – 1977. – V. 18. – P. 79–110.
19. Khabibullin M.Ya. Development of the design of the sucker-rod pump for sandy wells // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2019. – P. 012065. DOI: 10.1088/1757-899X/560/1/012065
20. Termani S.M. Filtration of aerosol particles by cylindrical fibers within a parallel and staggered array // *Microsystem Technologies*. – 2016. – V. 22. – № 5. – P. 965–977.
21. Шурайц А. Л., Бирюков А.В., Усачев А.П. Разработка методики расчета установок двухступенчатой очистки природного газа от механических примесей // *Научный журнал строительства и архитектуры*. – 2020. – № 3 (59). – С. 32–42. DOI: 10.36622/VSTU.2020.59.3.003.
22. Усачев А.П. Целевая функция, устанавливающая требования к системе защите, предотвращающей падение давления природного газа на фильтрующем элементе установки очистки сверх максимально допустимого значения // *Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов*. – 2011. – № 4 (86). – С. 164–173.
23. Усачев А.П. Целевая функция, устанавливающая требования по предотвращению попадания крупных твердых частиц в оборудование газорегуляторных пунктов // *Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов*. – 2011. – № 2 (84). – С. 133–141.
24. Suleimanov R.I., Khabibullin M.Ya., Suleimanov Re.I. Analysis of the reliability of the power cable of an electric-centrifugal pump unit // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. International Conference on Innovations and Prospects of Development of Mining Machinery and Electrical Engineering 2019*. – 2019. – P. 012054. DOI: 10.1088/1755-1315/378/1/012054
25. Шерстюк П.В. Определение оптимальной формы корпусов системы очистки природного газа // *Проблемы и решения обеспечения надежности и безопасности систем транспорта нефти и газа: материалы нефтегазового форума*. – 2011. – № 4. – С. 371–373.
26. Шерстюк П.В. Разработка внутренней защитной оболочки фильтрующего элемента в установке очистки природного газа // *Энергоэффективность. Проблемы и решения: материалы XII Всероссийской научно-практической конференции*. – Уфа, 2012. – С. 171–172.
27. Хабибуллин М.Я. Увеличение эффективности разделения жидких систем при сборе пластовой жидкости // *Нефтегазовое дело*. – 2020. – Т. 18. – № 2. – С. 64–71. DOI: 10.17122/ngdelo-2020-2-64-71
28. Шерстюк П.В. Разработка наружной защитной оболочки фильтрующего элемента в установке очистки природного газа //

- Энергоэффективность. Проблемы и решения: материалы XII Всероссийской научно-практической конференции. – Уфа, 2012. – С. 173–174.
29. Усачев А.П. Результаты опытов по выявлению динамики роста перепада давления в процессе засорения фильтрующего элемента твердыми частицами // Проблемы и методы обеспечения надежности и безопасности систем транспорта нефти, нефтепродуктов и газа: материалы международного форума. – Уфа, 2012. – С. 358–359.
 30. Гиляев Ген.Г., Хабибуллин М.Я., Гиляев Г.Г. Перспективы применения кислотного геля для закачки проппанта в процессе проведения гидроразрыва карбонатных пластов на территории самарской области // Нефтяное хозяйство. – 2020. – № 8. – С. 54–57. DOI: 10.24887/0028-2448-2020-8-54-57
 31. Усачев А.П. Совершенствование методических подходов к замеру перепада давления на цилиндрических фильтрующих элементах современных газовых фильтров сетчатого типа // Нефтегазовое дело. – 2015. – № 1. – Т. 13. – С. 131–136.
 32. Шурайц А.Л. Анализ существующей конструкции газового фильтра предварительной очистки с минимальной удельной металлоемкостью // Проблемы и методы обеспечения надежности и безопасности систем транспорта нефти, нефтепродуктов и газа: материалы науч.-практ. конф. – Уфа: Изд-во ИПТЭР, 2015. – С. 347–348.
 33. Салин Д.В. Предпосылки к разработке газового фильтра предварительной очистки с блоком вертикально расположенных фильтрующих цилиндрических элементов // Проблемы и методы обеспечения надежности и безопасности систем транспорта нефти, нефтепродуктов и газа: материалы науч.-практ. конф. – Уфа: Изд-во ИПТЭР, 2015. – С. 344–346.
 34. Mena L., Talaache Z. To a probabilistic approach of reinforced slope stability analysis // International Journal of Engineering & Technology. – 2013. – V. 5. – P. 125–130. DOI: 10.7763/IJET.2013.V5.525.
 35. Epistemic-based investigation of the probability of hazard scenarios using Bayesian network for the lifting operation of floating objects / A.B. Toroody, M.M. Abaiee, R. Gholamnia, M.J. Ketabdari // Journal of Marine Science and Application. – 2016. – V. 15. – P. 250–259. DOI: 10.1007/s11804-016-1361-y
 36. Khabibullin M.Ya., Suleimanov R.I. Automatic packer reliability prediction under pulsed transient flooding of hydrocarbon reservoirs // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. – 2019. – P. 012024. DOI: 10.1088/1757-899X/560/1/012024
 37. Густов С.В. Разработка методических положений по предотвращению попадания крупных твердых частиц в оборудованные газорегуляторных пунктов газа // Нефтегазовое дело. – 2012. – № 3. – С. 268–278.
 38. Гумеров А.Г., Усачев А.П., Шурайц А.Л. Математическая модель оптимизации системы комплексной защиты подземных резервуаров и трубопроводов сжиженного углеводородного газа путем заключения в футляр, заполненный азотом // Нефтегазовое дело. – 2008. – № 2. – Т. 6. – С. 38–46.
 39. Fattahi H., Ilghani N.Z. Slope stability analysis using Bayesian Markov Chain Monte Carlo Method // Geotech. Geol. Eng. – 2020. – V. 38. – P. 2609–2618. DOI: 10.1007/s10706-019-01172-w.
 40. Khabibullin M.Y. Theoretical grounding and controlling optimal parameters for water flooding tests in field pipelines // Journal of Physics: Conference Series. International Conference «Information Technologies in Business and Industry». – 2019. – P. 042013. DOI: 10.1088/1742-6596/1333/4/042013
 41. Густов С.В., Усачев А.П., Шурайц А.Л. Определение капитальных вложений в обогреваемое помещение для размещения фильтра // Энергоэффективность. Проблемы и решения: материалы XIV Всерос. науч.-практ. конф. – Уфа: Изд-во ИПТЭР, 2014. – С. 240–242.
 42. Кудряшова О.Б., Антонникова А.А. Физико-математическая модель эволюции двухфазных аэрозолей при ультразвуковом воздействии // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. – 2012. – № 4 (20). – С. 87–94.
 43. Хабибуллин М.Я. Совершенствование процесса солянокислотной обработки скважин применением новейших технологий и оборудования // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 10. – С. 128–134. DOI: 10.18799/24131830/2020/10/2861
 44. Кудряшова О.Б., Антонникова А.А. Математическая модель эволюции аэрозолей при ультразвуковом воздействии // Известия Томского политехнического университета. Математика и механика. – 2013. – Т. 322. – № 2. – С. 160–163.
 45. Valentine R.J. An assessment of the factors that contribute to the poor performance of geosynthetic-reinforced earth retaining walls // Proceedings of the International Symposium on Design and Practice of Geosynthetic-Reinforced Soil Structures. – Bologna, Italy, 14–16 October 2013. – P. 318–327.

Поступила 27.04.2022 г.

Информация об авторах

Хабибуллин М.Я., кандидат технических наук, доцент кафедры нефтепромысловых машин и оборудования, Институт нефти и газа, Уфимский государственный нефтяной технический университет (филиал в г. Октябрьский).

UDC 66.074.2/3:66.067.3

INCREASING THE EFFICIENCY OF THE MECHANISM FOR GAS CLEANING FROM OIL AEROSOLS BY FILTERS FROM METALLOCERAMIC MATERIALS

Marat Ya. Khabibullin,
m-hab@mail.ru

Ufa State Petroleum Technological University (Branch in the City of Oktyabrsky),
54a, Devonskaya street, Oktyabrsky, 452607, Russia.

The relevance of the research is caused by the need to increase in volumes the implementation of various technological processes associated with the effective purification of gases in ceramic filters. The most promising alternative to bag filters for removing dust from high-temperature gases are filters with elements made of porous permeable ceramic materials.

Purpose: to develop and propose a scheme of a laboratory setup for studying this process by using filters with large pores in the range of parameters under study by obtaining the effect of generating «secondary» aerosols and observing the breakthrough coefficient at the boundary with an increase in the filtration rate and particle size.

Objects. Single-layer filter elements were subjected to research – porous cylinders, two-layer filter elements, combined filter element. The latter was made by applying a layer of powder with larger particles (180 μm) to a single-layer element from a powder with particles of 45 μm in size. The combined filter element consisted of two elements: an outer single-layer element (particle size 180 μm , inner diameter 0,052 m, wall thickness 0,004 m) and a coaxial two-layer one inserted into it. The deposition of transformer oil aerosols obtained by spraying in a special fog generator was studied. The dispersed composition and concentration of aerosols before and after the filter were determined using a five-stage cascade impactor.

Methods. Laboratory studies were carried out according to the proposed methods for the effective purification of gases in ceramic filters at a temperature of 600 °C and more. However, the further development of these studies was hampered by the lack of sufficiently economical domestic ceramic porous filter elements. The most promising alternative to bag filters for dust removal of high-temperature gases are filters, the filter element of which is made of porous permeable ceramic materials – special type of ceramics made by special technological methods with increased porosity and with appropriate sizes and shapes of pores. While testing, the following characteristics were recorded: the hydraulic resistance of the sample, the temperature and air flow, the concentration and size of the droplets before and after the filter. The technology for creating porous permeable ceramic materials from powders is as follows: obtaining a narrowly fractionated filler powder (electrocorundum, disthene-sillimanite), selecting a technological binder (clay) and a temporary binder (polyvinyl alcohol), mixing the components in a certain ratio, pressing (specific pressure 30 MPa), drying (at 150–150 °C) and firing (at 1200–1300 °C) samples. The technology for creating porous permeable ceramic materials from fibers is as follows: obtaining an aqueous suspension of silicate fibers of a certain length (1–5 mm), molding samples by slip casting, drying and firing. A membrane was applied to a number of porous powder samples in order to create samples with a small pore size and evaluate their properties.

The results of the study of the relationship between the hydraulic resistance Δp of the filter elements and the flow rate of the droplet gas mixture were analyzed in the criterion form in order to exclude the influence of the individual characteristics of the samples and test conditions. The effect of generating «secondary» aerosols was established and confirmed by processing the results. The efficiency of filtration with two-layer and combined filters reaches 99,96 %. The obtained research results indicate the expediency of using ceramic filter elements in industrial devices.

Key words:

Capturing, single layer, double layer, combined, filter element.

REFERENCES

- Liu Z., Ji Z., Shang J., Chen H., Liu Y., Wang R. Improved design of two-stage filter cartridges for high sulfur natural gas purification. *Separation and Purification Technology*, 2018, vol. 198, pp. 155–162.
- Liu Z., Ji Z., Shang J., Chen H., Liu Y., Wang R. Filtration of aerosol particles by cylindrical fibers within a parallel and staggered array. *Microsystem Technologies*, 2016, vol. 22 (5), pp. 965–977.
- Khabibullin M.Ya., Suleimanov R.I. Improving the reliability of welded joints of pipelines in the reservoir pressure maintenance system. *Oil and Gas Business*, 2019, vol. 17, no. 5, pp. 93–98. In Rus. DOI: 10.17122/ngdelo-2019-5-93-98.
- Guo B., Ghalambor A. *Natural gas engineering handbook* [Natural gas engineering handbook]. 2nd ed. Houston, Texas, Gulf Publ. Company, 2012. 472 p.
- Chang Cheng, Ji Zhongli, Chuanbin Liu, Fengting Zhao. Permeability of filter cartridges used for natural gas filtration at high pressure. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2016, vol. 34, pp. 419–427.
- Mehdi A., Mohebbi A., Fabrizio S. Experimental study of filtration system performance of natural gas in urban transmission and distribution network: a case study on the city of Kerman. *Iran Fuel*, 2011, vol. 90, no. 3, pp. 11661171.
- Mokhatab S., Poe W. *Handbook of natural gas transmission and processing*. 2nd ed. USA, Kidlington, Oxford, Elsevier Inc, 2012, 802 p.
- Petrov D.V., Matrosov I.I. Raman gas analyzer (RGA): natural gas measurements. *Applied spectroscopy*, 2016, vol. 70, no. 10, pp. 1770–1776.
- Shurayts A.L. Identification of the value of the pressure drop margin on the filter element. *Problems and methods of ensuring the reliability and safety of oil, oil products and gas transport systems. Materials of the international forum*. Ufa, 2012. pp. 360–362.
- Khabibullin M.Ya. Improving the durability and reliability of centrifugal separators by using new materials. *Oil and Gas Business*, 2020, vol. 18, no. 3, pp. 107–112. In Rus. DOI: 10.17122/ngdelo-2020-3-107-112.
- Usachev A.P. Basic principles of the device and functioning of high-throughput gas cylindrical filtering devices. *Regional architecture and construction*, 2018, no. 1, pp. 141–147. In Rus
- Shurayts A.L., Gustov S.V., Nedlin M.S. Filtry predvaritel'noy ochistki – slaboe zveno v obshchey tsepi obespecheniya bezopasnosti gazoregulyatornykh punktov vysokoy propusknoy sposobnosti [Preliminary filters – a weak link in the overall safety chain of high-throughput gas control points]. *Problemy i metody obespecheniya nadezhnosti i bezopasnosti sistem transporta nefii, nefteproduktov i gaza. Materialy nauchno-prakticheskoy konfer-*

- entsii [Problems and methods of ensuring the reliability and safety of oil, oil products and gas transport systems. Materials of scientific-practical conference]. Ufa, 2014, no. 4, pp. 435–437.
13. Song G., Rossi P.S., Khan F., Paltrinieri N., Bahoo Toroody A. Model-based information fusion investigation on fault isolation of subsea systems considering the interaction among subsystems and sensors. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2020, vol. 67, pp. 104267. DOI: 10.1016/j.jlp.2020.104267.
 14. Khabibullin M.Ya. Investigation of the processes occurring in the pipe string during the wellhead pulsed injection of fluid into the well. *Oil and Gas Business*, 2018, vol. 16, no. 6, pp. 34–39. In Rus. DOI: 10.17122/ngdelo-2018-6-34-39.
 15. Usachev A.P. Development of a mathematical model for substantiating the type of system for coarse purification of natural gas from solid particles and optimizing its geometric and operational parameters. *Problems of collecting, preparing and transporting oil and oil products*, 2011, no. 1 (83), pp. 148–158. In Rus.
 16. Thomas D. *Aerosol filtration*. Oxford, Elsevier, 2016. 218 p.
 17. Bell G.G., Strauss W. Effectiveness of vertical mist eliminators in a cross flow-scrubber. *Journal of the Air Pollution Control Association*, 1973, vol. 23, no. 11, pp. 967–969.
 18. Billings C.E. Fabric filter installations for flue gas fly ash control. *Powder Technology*, 1977, vol. 18, pp. 79–110.
 19. Khabibullin M.Ya. Development of the design of the sucker-rod pump for sandy wells. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, pp. 012065. DOI: 10.1088/1757-899X/560/1/012065
 20. Termani S.M. Filtration of aerosol particles by cylindrical fibers within a parallel and staggered array. *Microsystem Technologies*, 2016, vol. 22, no. 5, pp. 965–977.
 21. Shurayts A.L., A. V. Biryukov A.V., Usachev A.P., J. Development of a methodology for calculating installations for two-stage purification of natural gas from mechanical impurities. *Scientific journal of construction and architecture*, 2020, no. 3 (59), pp. 32–42. DOI: 10.36622/VSTU.2020.59.3.003. In Rus.
 22. Usachev A.P. Objective function that establishes the requirements for the protection system that prevents the pressure drop of natural gas on the filter element of the purification unit in excess of the maximum allowable value. *Problems of collecting, preparing and transporting oil and oil products*, 2011, no. 4 (86), pp. 164–173. In Rus.
 23. Usachev A.P. Objective function that establishes the requirements for preventing the ingress of large solid particles into the equipment of gas control points. *Problems of collecting, preparing and transporting oil and oil products*, 2011, no. 2 (84), pp. 133–141. In Rus.
 24. Suleimanov R.I., Khabibullin M.Ya., Suleimanov Re.I. Analysis of the reliability of the power cable of an electric-centrifugal pump unit. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. International Conference on Innovations and Prospects of Development of Mining Machinery and Electrical Engineering 2019*, 2019, pp. 012054. DOI: 10.1088/1755-1315/378/1/012054
 25. Sherstyuk P.V. Determination of the optimal form of natural gas purification system housings. *Problems and solutions of ensuring the reliability and safety of oil and gas transport systems: materials of the oil and gas forum*, 2011, no. 4, pp. 371–373. In Rus.
 26. Sherstyuk P.V. Razrabotka vnutrenney zashchitnoy obolochki filtryushchego elementa v ustanovke ochistki prirodnogo gaza [Development of the inner protective shell of the filter element in the installation of natural gas purification]. *Energoeffektivnost. Problemy i resheniya. Materialy XII Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Energy Efficiency. Problems and solutions. Proc. of the XII All-Russian Scientific and Practical Conference]. Ufa, 2012. pp. 171–172.
 27. Khabibullin M.Ya. Increasing the efficiency of separation of liquid systems during the collection of reservoirs fluid. *Oil and gas business*, 2020, vol. 18, no. 2, pp. 64–71. In Rus. DOI: 10.17122/ngdelo-2020-2-64-71.
 28. Sherstyuk P.V. Razrabotka vneshney zashchitnoy obolochki filtryushchego elementa v ustanovke ochistki prirodnogo gaza [Development of the outer protective shell of the filter element in a natural gas purification unit]. *Energoeffektivnost. Problemy i resheniya. Materialy XIV Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Energy Efficiency. Problems and solutions. Proceedings of the XII All-Russian Scientific and Practical Conference]. Ufa, 2012. pp. 173–174.
 29. Usachev A.P. Rezultaty opytov po vyyavleniyu dinamiki rosta perezada davleniya v protsesse zasoreniya filtryushchego elementa tverdyimi chastitsami [Results of experiments to identify the dynamics of pressure drop growth in the process of filter element clogging with solid particle]. *Problemy i metody obespecheniya nadezhnosti i bezopasnosti sistem transporta nefii, nefiiproduktov i gaza. Materialy mezhdunarodnogo foruma* [Problems and methods of ensuring reliability and safety of oil, oil products and gas transport systems: materials of the international forum]. Ufa, 2012. pp. 358–359.
 30. Gilaev Gen.G., Khabibullin M.Ya., Gilaev G.G. Prospects for the use of acid gel for proppant injection in the process of hydraulic fracturing of carbonate reservoirs in the Samara region. *Oil industry*, 2020, no. 8, pp. 54–57. In Rus. DOI: 10.24887/0028-2448-2020-8-54-57.
 31. Usachev A.P. Improvement of methodological approaches to measuring the pressure drop on cylindrical filter elements of modern gas filters of the mesh type. *Oil and gas business*, 2015, no. 1, vol. 13, pp. 131–136. In Rus.
 32. Shurayts A.L. Analiz sushchestvuyushchey konstruktssii gazovogo filtra predvaritelnoy ochistki s minimalnoy udelnoy teploemkostyu [Analysis of the existing design of a gas pre-treatment filter with a minimum specific metal content]. *Problemy i metody obespecheniya nadezhnosti i bezopasnosti sistem transporta nefii, nefiiproduktov i gaza. Materialy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Problems and methods of ensuring the reliability and safety of oil, oil products and gas transport systems. Materials of scientific-practical. Conference]. Ufa, IPTER Publ. House, 2015. pp. 347–348.
 33. Salin D.V. Predposylki k razrabotke gazovogo filtra predvaritelnoy ochistki s blokom vertikalno raspolozhennykh filtryushchikh tsilindricheskikh elementov [Prerequisites for the development of a gas pre-filter with a block of vertically arranged filtering cylindrical elements]. *Problemy i metody obespecheniya nadezhnosti i bezopasnosti sistem transporta nefii, nefiiproduktov i gaza. Materialy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Problems and methods of ensuring the reliability and safety of oil, oil products and gas transport systems: materials of scientific-practical. conference]. Ufa, IPTER Publ. House, 2015. pp. 344–346.
 34. Menaa L., Talaache Z. To a probabilistic approach of reinforced slope stability analysis. *International Journal of Engineering & Technology*, 2013, vol. 5, pp.125–130. DOI: 10.7763/IJET.2013.V5.525.
 35. Toroody A.B., Abaiee M.M., Gholamnia R., Ketabdari M.J. Epistemic-based investigation of the probability of hazard scenarios using Bayesian network for the lifting operation of floating objects. *Journal of Marine Science and Application*, 2016, vol. 15, pp. 250–259. DOI: 10.1007/s11804-016-1361-y.
 36. Khabibullin M.Ya., Suleimanov R.I. Automatic packer reliability prediction under pulsed transient flooding of hydrocarbon reservoirs. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 2019*, 2019, pp. 012024. DOI: 10.1088/1757-899X/560/1/012024
 37. Gustov S.V. Development of methodological provisions to prevent the ingress of large solid particles into the equipment of gas control points. *Oil and Gas Business*, 2012, no. 3, pp. 268–278. In Rus.
 38. Gumerov A.G., Usachev A.P., Shurayts A.L. Mathematical model for optimizing the system of complex protection of underground tanks and pipelines of liquefied hydrocarbon gas by enclosing it in a case filled with nitrogen. *Oil and Gas Business*, 2008, no. 2, vol. 6, pp. 38–46. In Rus.
 39. Fattahi H., Ilghani N.Z. Slope stability analysis using Bayesian Markov Chain Monte Carlo Method. *Geotech. Geol. Eng.*, 2020, vol. 38, pp. 2609–2618. DOI: 10.1007/s10706-019-01172-w.
 40. Khabibullin M.Y. Theoretical grounding and controlling optimal parameters for water flooding tests in field pipelines. *Journal of Physics: Conference Series. International Conference «Information Technologies in Business and Industry»*, 2019, pp. 042013. DOI: 10.1088/1742-6596/1333/4/042013
 41. Gumerov A.G., Usachev A.P., Shurayts A.L. Opredelenie kapitalnykh vlozheniy v obogrevaemoe pomeshchenie dlya razmeshcheniya filtra [Determination of capital investments in a heated room for filter placement]. *Energoeffektivnost. Problemy i resheniya. Materialy XIV Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Energy Efficiency. Problems and solutions. Materials of XIV All-Russian scientific and practical conference]. Ufa, IPTER Publ. House, 2014. pp. 240–242.

42. Kudryashova O.B., Antonnikova A.A. Physico-mathematical model of the evolution of two-phase aerosols under ultrasonic action. *Bulletin of the Tomsk State University. Mathematics and mechanics*, 2012, no. 4 (20), pp. 87–94. In Rus.
43. Khabibullin M.Ya. Improving the process of hydrochloric acid treatment of wells using the latest technologies and equipment. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 10, pp. 128–134. DOI: 10.18799/24131830/2020/10/2861. In Rus.
44. Kudryashova O.B., Antonnikova A.A. Mathematical model of the evolution of aerosols under ultrasonic exposure. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2013, vol. 322, no. 2, pp. 160–163. In Rus.
45. Valentine R.J. An assessment of the factors that contribute to the poor performance of geosynthetic-reinforced earth retaining walls. *Proc. of the International Symposium on Design and Practice of Geosynthetic-Reinforced Soil Structures*. Bologna, Italy, 14–16 October 2013, pp. 318–327.

Received: 27 April 2022.

Information about the authors

Marat Ya. Khabibullin, Cand. Sc., associate professor, Ufa State Petroleum Technological University (Branch in the City of Oktyabrsky).

УДК 622.279.8

АНАЛИЗ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ВОДОГАЗОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ПЛАСТЫ С НАЛИЧИЕМ ГАЗОВОЙ ШАПКИ С ЦЕЛЬЮ УВЕЛИЧЕНИЯ НЕФТЕОТДАЧИ И УТИЛИЗАЦИИ НИЗКОНАПОРНОГО ПОПУТНОГО ГАЗА НА ПРИМЕРЕ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

Зятиков Павел Николаевич¹,
zrpavel@tpu.ru

Мазитов Руслан Фаритович²,
MazitovRuF@tmn.lukoil.com

Волков Павел Валерьевич²,
VolkovPV@tmn.lukoil.com

Захарова Наталья Павловна²,
ZaharovaNP@tmn.lukoil.com

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

² ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг» «КогалымНИПИнефть», Россия, 625026, г. Тюмень, ул. Республики, 143а.

Актуальность исследования обусловлена тем, что в настоящее время на территории Западной Сибири находится большое количество залежей нефтяных оторочек, пластов с высоким газосодержанием или наличием газовой шапки. В них сосредоточена огромная доля запасов. Разработка таких залежей простыми методами (например, жесткий водонапорный режим) затруднительна, так как на них наблюдается резкое снижение пластового давления и невозможность его восстановления данными механизмами. Необходимо рассматривать альтернативные способы воздействия для вовлечения в разработку трудноизвлекаемых запасов углеводородов. В статье рассмотрено совместное применение водогазового воздействия с утилизацией попутного нефтяного газа. Методика обусловлена тем, что в первую очередь разработан механизм компримирования газа и смешивания с жидкостью для поддержания пластового давления. Совместная методика водогазового воздействия позволит эффективно воздействовать на залежи с высоким содержанием газа, а также позволит исключить необходимость утилизации попутного нефтяного газа вследствие ведения технологических процессов.

Цель: исследовать и предложить метод применения водогазового воздействия с утилизацией попутного нефтяного газа для участков с высоким темпом падения пластового давления.

Объект: залежи с высоким содержанием растворенного и свободного газа, находящиеся в разработке.

Методы: теоретические методы для обоснования способа повышения давления газа и способности его смешивания с жидкостью для поддержания пластового давления, аналитические и расчетные методы.

Результаты. Была получена методика компримирования и смешивания попутного нефтяного газа, рассмотрена методика применения водогазового воздействия при помощи программного обеспечения, и доказана эффективность метода.

Ключевые слова:

Попутный нефтяной газ, компримирование, водогазовое воздействие, поддержание пластового давления, компрессор, водогазовая смесь, пластовое давление, давление насыщения нефти газом, сепаратор.

Введение

Со временем пластовое давление на участках отбора нефти и газа снижается, а традиционный метод компенсации, водонапорный режим, не дает требуемого эффекта [1]. Чтобы создать поршневой эффект для вытеснения углеводородов в пласте и увеличить пластовое давление, необходимо рассматривать альтернативные способы воздействия на залежь. Одним из таких способов является водогазовое воздействие [2, 3]. В производственной практике встречаются различные способы водогазового воздействия на пласт, например, закачка сухого или жирного газа, азота или углекислого газа, а также водогазовой смеси в пласт с её приготовлением непосредственно на насосе в пластовых условиях. Каждая из этих методик эффективна при различных геологических и технологических

условиях объектов разработки [4, 5]. В статье рассматривается технология водогазового воздействия путем закачки водогазовой смеси в поверхностных условиях. Данная методика наиболее эффективна для разработки трудноизвлекаемых запасов на месторождениях, характеризующихся наличием газовой шапки или нефтяной оторочки. Разработка таких объектов обусловлена низким коэффициентом извлечения нефти из-за прорывов газа и воды в период эксплуатации.

Закачка водогазовой смеси (ВГС) как вытесняющего агента уже применяется в России на месторождениях с нефтяной оторочкой и показывает достаточно хорошие результаты [6].

В статье рассмотрена модернизация применения данной технологии закачки ВГС с целью увеличения КИН при разработке подгазовых зон нефтеконденсатных месторождений.

Применение водогазового воздействия

Применение технологии закачки ВГС является эффективным методом увеличения нефтеотдачи на пластах или участках залежей в подгазовой зоне (наличие газовой шапки) и нефтяных оторочках [7, 8]. Рассматриваемая технология имеет ряд преимуществ в отличие от других технологий водогазового воздействия:

- 1) повышает нефтеотдачу пласта за счет достижения:
 - более высокого коэффициента вытеснения при наличии газа;
 - более высокого коэффициента охвата при наличии воды;
- 2) ограничивает темпы прорыва воды в добывающие скважины;
- 3) имеет возможность применения технологии:
 - составе действующей системы ППД;
 - как на отдельных скважинах, так и на конкретных объектах разработки;
- 4) является рациональным решением проблемы утилизации попутного газа на промыслах [9–11].

При подготовке ВГС нет ограничений по составу смешиваемого газа, и поэтому можно смешивать сухой газ, обогащенный, жирный, вплоть до широкой фракции легких углеводородов (ШФЛУ), что очень важно для увеличения нефтеотдачи, потому что можно менять реологию жидкости [12, 13]. Также данный факт очень важен для утилизации газа любого ряда углеводородов с расположенных рядом объектов.

При понижении давления ниже давления насыщения газ начинает выделяться из нефти. Это приводит к дегазированию жидкости и возникновению в пласте двухфазной фильтрации – газ плюс нефть. Для режима растворенного газа характерен высокий темп падения пластового давления, увеличение газового фактора. При определенных условиях газ в пласте способен выделяться из жидкости (закачиваемой в скважины ППД) и восполнять энергию пласта, при этом необходимо соблюдать технологический режим закачки, чтобы полученное пластовое давление не превышало давление насыщения и залежь работала по характеру вытеснения газовой репрессии [14, 15].

В период работы скважин в режиме $P_{пл} = P_{нас}$ на забое скважины газ прорывается к отверстиям перфораций добывающих скважин. Образуются два конуса: газ сверху, нефть плюс вода снизу, продукция загасывается и обводняется. Рассматриваемая технология водогазового воздействия ориентирована на работу залежи при давлении ниже давления насыщения и недопущение прорыва газа, а также на исключение подтягивания конуса воды.

Технологию можно совмещать с нестационарным воздействием для перераспределения фильтрационных потоков жидкости (ПФПЖ) и вовлечения в разработку слабо дренируемых зон.

При оптимальном расчете метода, подборе скважин-кандидатов можно снизить объем газа на утилизацию с регламентируемых 95 до 100 %.

Эффективная реализация закачки ВГС зависит от наличия:

- достаточного объема газа и воды, соответствующих проектным;
- качественного оборудования.

По геологическим свойствам технология более применима к однородным пластам, но также применима и на залежах, характеризующихся латеральной и вертикальной неоднородностью, каковыми являются по большей своей части нефтяные оторочки. Главное условие – наличие свободного газа. Применение технологии наиболее эффективно при условии, когда пластовое давление ниже давления насыщения для работы в режиме газовой репрессии. Если внедрять технологию закачки водогазовой смеси на стадии, когда давление в пласте выше давления насыщения, воздействие будет неэффективным. Так как при давлении выше давления насыщения поступающий газ извне будет растворяться в нефти, а на забое дегазироваться, что пагубно сказывается на работе насосного оборудования.

Предлагаемая схема применения водогазового воздействия

Как уже упоминалось выше, технология закачки ВГС успешно применяется на месторождениях Восточной Сибири [6, 7]. Схема подготовки ВГС состоит из линии нагнетания от компрессора, которая подключается в водовод высокого давления, который по стандартной схеме идет от кустовой насосной станции (КНС) до кустов скважин и непосредственно в нагнетательные скважины или врезается в водовод на кусту скважин в составе блочной кустовой насосной станции (БКНС). Для работы данной схемы необходим высоконапорный компрессор для перекачки горючих жидкостей и газов. На вход компрессоров подается низконапорный нефтяной попутный газ. Коэффициент компримирования составляет порядка 15–20. Промысловый опыт показывает, что данная схема малоэффективна, так как:

- для обеспечения высокого значения компримирования необходимо высокотехнологичное оборудование, что напрямую влияет на его стоимость;
- для компримирования большого расхода необходимо две ступени повышения давления;
- для стабильной работы системы необходимо наличие резервных агрегатов для каждой ступени;
- для «обвязки» компрессора необходимы вспомогательные линии, дренажные линии, линии сброса излишнего давления, датчики расхода, давления, температуры смеси, температуры подшипников, что проблематично, если агрегат устанавливается вдали от блока управления;
- необходимо проводить обход и осмотр оборудования каждые 2 часа;
- возможны частые аварийные остановки компрессора [8–10].

Поэтому в работе предлагается рассмотреть другую схему закачки ВГС в пласт. Принципиальное отличие данной схемы состоит в том, что повышение давления газа (для растворения в жидкости) будет происходить по ступеням и при помощи энергии

нагнетаемой воды путем смешения в эжекторе и разделения в сепараторе [11, 12].

На рис. 1 представлен один из программных расчетов смешения низконапорного газа с жидкостью от кутовой насосной станции для закачки в пласт с ито-

говым давлением 164,4 атм. Степень повышения давления насосов первой очереди составляет 2,5. Степень повышения давления насосов второй очереди составляет 2.

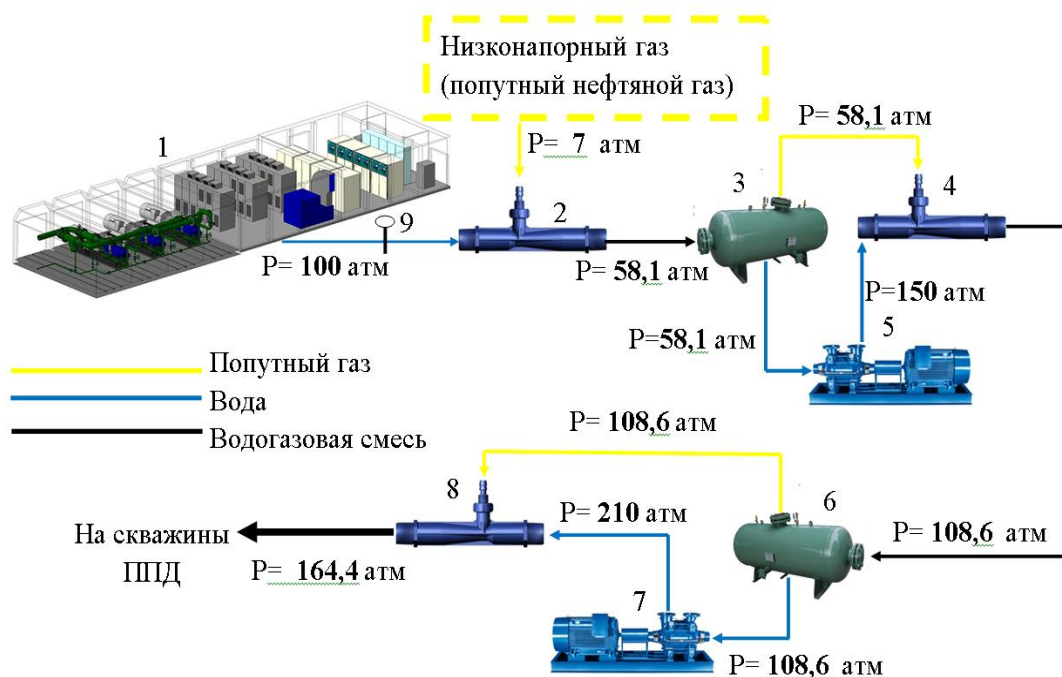


Рис. 1. Предлагаемая схема подготовки водогазовой смеси (1 – кутовая насосная станция; 2, 4, 8 – эжектор; 3, 6 – сепаратор; 5, 7 – насос; 9 – регулирующий клапан)

Fig. 1. Proposed scheme for preparation of a water-gas mixture (1 – cluster pumping station; 2, 4, 8 – ejector; 3, 6 – separator; 5, 7 – pump; 9 – control valve)

С линии высокого давления от КНС подается вода (давление на насосах КНС регулировать нет необходимости) с требуемым давлением, которое поддерживается клапаном – 9 согласно установочному значению датчика давления. Далее вода поступает на эжектор – 2 [ВН поток], в который подается попутный газ [НН поток]. Смесь перемешивается и поступает на сепаратор – 3, где разделяется на воду и газ, но с уже большим давлением газа. Далее газ поступает на эжектор – 4, а вода сначала на высоконапорный насос – 5, а затем на эжектор – 4 вход [ВН поток].

После смешивания смесь идет на сепаратор второй ступени – 6. Далее смесь разделяется, и газ с еще большим давлением выходит из сепаратора и поступает на эжектор – 8 [НН поток], а вода сначала на высоконапорный насос – 7, затем на вход эжектора – 8 [ВН поток]. На выходе из эжектора получается готовая водогазовая смесь, которая с определенным давлением закачивается через скважины ППД в пласт [13–15].

Расчет применения технологии водогазового воздействия на гидродинамическом симуляторе

Для оценки эффективности предлагаемой схемы закачки ВГС был произведен расчет дополнительной добычи нефти в гидродинамическом симуляторе T-Navigator. Для более точных расчетов была построена композиционная модель XX куста скважин на ме-

сторождении. При создании композиционной модели, где задан компонентный состав для каждой фазы (в отличие от модели «летучей нефти»), была получена более детальная картина распределения запасов, изучена особенность массообменных процессов внутри пласта (рис. 2) [16, 17].

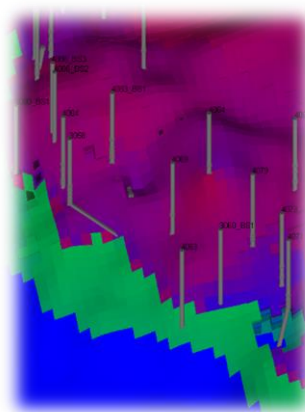


Рис. 2. Композиционная модель куста скважин
 Fig. 2. Compositional model of the well cluster

Цветовые обозначения на схеме: фиолетовый – газовая составляющая, зеленый – нефть, эмульсия, синий – пластовая вода.

При расчете эффекта прироста добычи рассматривалось три варианта разработки для сравнения:

- 1) добыча нефти путем вытеснения с исходной схемой разработки (две скважины ППД с закачкой воды);
- 2) добыча нефти модернизированной схемой закачки (перевод из добывающего фонда двух скважин в систему ППД).

Прирост добычи нефти составил порядка 33 тыс. т после модернизации системы ППД.

- 3) добыча нефти модернизированной схемой закачки с внедрением технологии водогазового воздействия и переводом в ППД двух скважин из добывающего фонда.

Прирост добычи нефти составил порядка 85 тыс. т после модернизации системы ППД и ВГВ (рис. 3).



Рис. 3. Изменение уровней добычи нефти при модернизации системы ППД

Fig. 3. Change in oil production levels during modernization of the reservoir pressure maintenance system

Расчет проводился за 50 лет разработки. Прирост КИН составил 0,077 д. ед.

Оценка экономической эффективности

По результатам расчетов технологической эффективности применения ВГС рассчитана экономическая эффективность от модернизации технологии ППД с применением водогазового воздействия на залежь.

В табл. 1 рассмотрены затраты на обустройство системы для подготовки ВГС и закачки в пласт [18, 19].

Рассмотрим экономические показатели за рентабельный период при реализации проекта (табл. 2).

Дополнительные капитальные затраты на реализацию МУН по варианту № 3 составили 52 млн р. Чистый дисконтированный доход (NPV) при повышении КИН на 0,077 д. ед составил 472 млн р. (рис. 4).

Таблица 1. Инвестиции на реализацию проекта

Table 1. Investments for the project implementation

Наименование/Name	Количество Quantity	Сумма, млн р. Amount, million rubles
Капитальные затраты/Capital expenditures		52
Эжектор/Ejector	3	1
Высоконапорные насосы типа КМ80-50-200 High-pressure pumps of the KM80-50-200 type	2	0,5
Работы по обустройству системы подготовки водогазовой смеси Work on the arrangement of the water-gas mixture preparation system	2	10
Трубопровод высокого давления DN 80, L=10 км (до врезки в основную систему ППД и обустройства системы подготовки) High pressure pipeline DN 80, L=10 km (before insertion into the main RPM system and arrangement of the preparation system)	1	35
Клапанные сборки, расходомеры, алгоритмизация работы, прикладное ПО Valve assemblies, flow meters, work algorithms, application software	1	5
Аварийные и дренажные ёмкости V=64 м ³ Emergency and drainage tanks V=64 m ³	1	0,5
Эксплуатационные затраты/Operating costs		
Спецжидкости для работы установки/Special fluids for plant operation	200 л/год l/year	2
Итого/Total		54

Таблица 2. Экономические показатели

Table 2. Economic indicators

Показатель/Index	Единица измерения Unit of measurement	Сумма, млн р. Amount, million rubles
Средняя цена нефти Brent (номинальная) Average Brent oil price (nominal)	\$/бар/\$/bar	53,6
Налог на добычу полезных ископаемых Mineral extraction tax	млн р. million rubles	1 557
Капитальные вложения Capital investments		52
IRR (внутренняя норма доходности) Internal rate of return	%	46,66 %
DPP (дисконтированный период окупаемости) Discounted payback period	год/year	5
DPI (дисконтированный индекс доходности) Discounted profitability index	доли ед. share of units	–
NPV (чистый дисконтированный доход) Net present value	млн р. million rubles	472

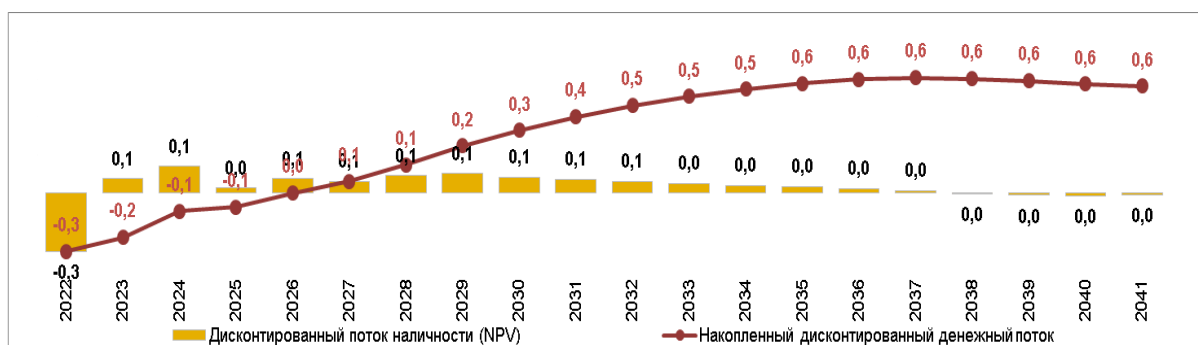


Рис. 4. Динамика дисконтированного денежного потока, млрд р.

Fig. 4. Dynamics of discounted cash flow, billion rubles

Заключение

Проведены аналитические расчеты, изучена и предложена методика водогазового воздействия с совместной утилизацией попутного нефтяного газа при подготовке смеси, а также технология смешивания низконапорного газа с водой системы поддержания пластового давления для закачки в пласт. Данная методика позволит оказывать воздействие на залежи с высоким содержанием газа с целью увеличения охвата продуктивного пласта заводнением, а также воздействием газовой репрессией, что приведет к увеличению нефтеотдачи [20].

Технология закачки водогазовой смеси позволит увеличить выработку запасов при разработке подгазовых зон нефтяных оторочек нефтегазоконденсатных месторождений на 10–20 %, что сделает разра-

ботку нефтяных оторочек экономически рентабельной. Предлагаемая схема подготовки и закачки водогазовой смеси имеет невысокую стоимость обустройства, что делает систему экономически эффективной.

Для автоматизированного расчета смешения газа и жидкости, а также оценки итогового пластового давления разработано и зарегистрировано специализированное программное обеспечение на языке программирования на C shell. Программа позволяет анализировать пластовое давление, режим работы установки по подготовке смеси, вычислять необходимое количество расхода реагента. Любые совпадения с реальными значениями добычи являются случайными. Приведенные данные не несут прогнозный характер, а являются показателями эффективности применения данной технологии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Оганесян С.А. Энергетическая стратегия России до 2020 г., ее реализация и перспективы развития ТЭК // Энергоназор и энергобезопасность. – 2006. – № 2. – С. 30–38.
2. Хисамутдинов Н.И. Проблемы извлечения остаточной нефти физико-химическими методами. – М.: ВНИ-ИОЭНГ, 2001. – 184 с.
3. Выломов Д.Д. Оптимизация системы поддержания пластового давления путем закачки пластовой воды вместо пресной // Нефтяное хозяйство. – 2020. – № 7. – С. 13–18.
4. Демахин С.А., Шипилов А.И. Многообразие кислотных систем для интенсификации дебита в сложных условиях // Нефтегазовая вертикаль. – 2019. – № 7. – С. 52–53.

5. Щуров В.И. Техника и технология добычи нефти. – М.: Недра, 1983. – 510 с.
6. Дроздов А.А., Телков В.П. Водогазовое воздействие на пласт: механизм действия, известные технологии. Насосно-эжекторная технология и насосно-компрессорная технология как ее разновидности // Труды Российского государственного университета нефти и газа имени И.М. Губкина. – 2009. – № 1. – С. 23–33.
7. Nativ R. Injection of industrial wastewater in Israel: siting criteria for deep injection wells and associated problems // Soil and Water Sciences. – 1994. – V. 134. – P. 171–173.
8. Moradi B. Calculation of temperature profile in injection wells // Journal of Petroleum Exploration and Production Technology. – 2020. – V. 10. – P. 687–697.

9. Devold H. Oil and gas production handbook. – Oxford: Cambridge University Press, 2006. – 199 p.
10. Abgrall R. Discrete equations for physical and numerical compressible multiphase mixtures // Journal of Computational Physics. – 2016. – V. 186. – P. 361–396.
11. Габдрахманов Р.А. Оптимизация системы поддержания пластового давления путем закачки пластовой воды вместо пресной // Нефтяное хозяйство. – 2020. – № 7. – С. 44–49.
12. Пятибратов П.В. Повышение нефтеотдачи низкопроницаемых пластов на основе одновременно-раздельной добычи и закачки газа // Нефтяное хозяйство. – 2021. – № 3. – С. 55–61.
13. Напалков В.Н., Нургалиева Н.Г., Плотникова И.Н. Особенности применения метода соляно-кислотной обработки в кавернозно-трещиноватых карбонатных коллекторах высоковязких нефтей // Георесурсы. – 2009. – № 3 (31). – С. 44–45.
14. Muskat Morris. Oil Recovery – 100 percent // Industrial Engineering Chemistry. – 1953. – V. 45. – № 7. – P. 1401–1405.
15. Kermit E. The technology of artificial lift methods. – Singapore: Word Scientific Publ. Co., 1977. – 150 p.
16. Steward M. Surface production operations. – Saarbrucken: Lambert Academic Publ., 1999. – 186 p.
17. Фаттахов Р.Б. Применение объемных насосов при решении вопросов энергоэффективной эксплуатации системы поддержания пластового давления // Нефтяное хозяйство. – 2013. – № 7. – С. 54–57.
18. Moradi B. A thermal study of fluid flow characteristics in injection wells. – Saarbrucken: Lambert Academic Publ., 2013. – 145 p.
19. Economides M. Petroleum production systems. – Amsterdam: Elsevier Science, 1993. – 177 p.
20. Жумагулов Б.Т., Мухамбетжанов С.Т. Моделирование вытеснения нефти с учетом массообменных процессов. – Алмата: КазгосИНТИ, 2004. – 252 с.

Поступила 11.05.2022 г.

Информация об авторах

Зятиков П.Н., доктор технических наук, профессор отделения добычи нефти Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Мазитов Р.Ф., начальник отдела планирования методов повышения нефтеотдачи пластов по объектам Нижневартовского свода ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг» «КогалымНИПИнефть».

Волков П.В., ведущий инженер отдела анализа и проектирования технологий разработки месторождений ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг» «КогалымНИПИнефть».

Захарова Н.П., старший научный сотрудник отдела планирования методов повышения нефтеотдачи пластов по объектам Сургутского свода ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг» «КогалымНИПИнефть».

UDC 622.279.8

ANALYSIS OF THE APPLICATION OF THE TECHNOLOGY OF WATER AND GAS IMPACT ON THE FORMATIONS WITH THE PRESENCE OF A GAS CAP FOR INCREASING OIL RECOVERY AND UTILIZATION OF LOW-PRESSURE ASSOCIATED GAS ON THE EXAMPLE OF THE FIELDS OF WESTERN SIBERIA

Pavel N. Zyatikov¹,
zpavel@tpu.ru

Ruslan F. Mazitov²,
MazitovRuF@tmn.lukoil.com

Pavel V. Volkov²,
VolkovPV@tmn.lukoil.com

Natalia P. Zakharova²,
ZaharovaNP@tmn.lukoil.com

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

² Lukoil-Engineering,
143a, Respubliki street, Tyumen, 625026, Russia.

The relevance of the study is caused by the fact that at present there are practically no pure oil fields left on the territory of Western Siberia. A huge share of reserves is concentrated in oil rims, reservoirs with high gas pressure or the presence of a gas cap. The development of such oil fields by simple methods (for example, a rigid water pressure mode) is difficult, since there is a sharp decrease in reservoir pressure on them and the impossibility of its recovery by these mechanisms. It is necessary to consider alternative methods of influence to involve hard-to-recover hydrocarbon reserves in the development. The article discusses the combined use of water-gas treatment with the utilization of associated oil gas. The technique is caused by the fact that, first of all, a mechanism for gas compression and mixing with liquid has been developed to maintain reservoir pressure. The joint methodology of water-gas impact will allow effectively influencing reservoir with high gas pressure, and will also eliminate the need for utilization of associated oil gas due to technological processes.

The main aim is to research and suggest a method for using water-gas impact with the recycling of associated oil gas for areas with a rate of reservoir pressure drop.

Object: reservoir with high gas content under development.

Methods: theoretical methods to substantiate the way of increasing gas pressure and the ability to mix gas with liquid to maintain reservoir pressure, analytical and computational methods.

Results. The authors obtained the technique for compressing and mixing associated oil gas. The paper considers the technique for applying water-gas treatment using software. The effectiveness of the method was proved.

Key words:

Associated oil gas, compression, water-gas treatment, reservoir pressure maintenance, compressor, water-gas mixture, reservoir pressure, oil-gas saturation pressure, separator.

REFERENCES

- Oganessian S.A. Energy strategy of Russia until 2020, its implementation and prospects for the development of the fuel and energy complex. *Energy supervision and energy security*, 2020, vol. 2, pp. 30–38. In Rus.
- Khisamutdinov N.I. *Problemy izvlechenia ostatochnoy nefi fiziko-khimicheskimi metodami* [Problems of residual oil recovery by physicochemical methods]. Moscow, VNI-IOENG publ., 2001. 184 p.
- Vylomov D.D. Optimization of the reservoir pressure maintenance system by injecting produced water instead of fresh water. *Oil Industry*, 2020, vol. 7, pp. 13–18. In Rus.
- Demakhin S.A., Shipilov A.I. Variety of acid systems for intensification of flow rate in difficult conditions. *Oil and Gas Vertical*, 2019, vol. 7, pp. 52–53. In Rus.
- Shchurov V.I. *Tekhnika i tekhnologiya dobichi nefi* [Technique and technology of oil production]. Moscow, Nedra Publ., 1983. 510 p.
- Drozdov A.A., Telkov V.P. Water-gas impact on the formation: mechanism of action, known technologies. Pump-ejector technology and pump-compressor technology as its variety. *Proceedings of the Russian State University of Oil and Gas named after I.M. Gubkin*, 2009, vol. 1, pp. 23–33. In Rus.
- Nativ R. Injection of industrial wastewater in Israel: siting criteria for deep injection wells and associated problems. *Soil and Water Sciences*, 1994, vol. 134, pp. 171–173.
- Moradi B. Calculation of temperature profile in injection wells. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 2020, vol. 10, pp. 687–697.
- Devold H. *Oil and gas production handbook*. Oxford, Cambridge University Press, 2006. 199 p.
- Abgrall R. Discrete equations for physical and numerical compressible multiphase mixtures. *Journal of Computational Physics*, 2016, vol. 186, pp. 361–396.
- Gabdrakhmanov R.A. Optimization of the reservoir pressure maintenance system by injecting produced water instead of fresh water. *Oil Industry*, 2020, vol. 7, pp. 44–49. In Rus.
- Pyatibratov P.V. Enhanced oil recovery of low-permeability formations based on simultaneous-separate production and injection of gas. *Oil Industry*, 2021, vol. 3, pp. 55–61. In Rus.
- Napalkov V.N., Nurgalieva N.G., Plotnikova I.N. Features of the application of the method of hydrochloric acid treatment in cavernous-fractured carbonate reservoirs of high-viscosity oils. *Georesursy*, 2009, vol. 3, pp. 44–45. In Rus.
- Muskat Morris. Oil Recovery – 100 percent. *Industrial Engineering Chemistry*, 1953, vol. 45, pp. 1401–1405.

15. Kermit E. *The technology of artificial lift methods*. Singapore, Word Scientific Publ. Co., 1977. 150 p.
16. Steward M. *Surface production operations*. Saarbrucken, Lambert Academic Publ., 1999. 186 p.
17. Fattakhov R.B. The use of positive displacement pumps in solving the issues of energy efficient operation of the reservoir pressure maintenance system. *Oil industry*, 2013, vol. 7, pp. 54–57. In Rus.
18. Moradi B. *A thermal study of fluid flow characteristics in injection wells*. Saarbrucken, Lambert Academic Publ., 2013. 145 p.
19. Economides M. *Petroleum production systems*. Amsterdam, Elsevier Science, 1993. 177 p.
20. Zhmagulov B.T., Mukhambetzhano S.T. *Modelirovaniye vytesneniya nefi s uchetom massoobmennykh protsessov* [Modeling of oil displacement taking into account mass transfer processes]. Almaty, KINTI Publ., 2004. 252 p.

Received: 11 May 2022.

Information about the authors

Pavel N. Zyatikov, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Ruslan F. Mazitov, chief of section, Lukoil-Engineering.

Pavel V. Volkov, lead engineer, Lukoil-Engineering.

Natalia P. Zakharova, lead engineer, Lukoil-Engineering.

УДК 622.684

ГРАНИЧНЫЕ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ПРИМЕНИМОСТИ ФРОНТАЛЬНЫХ ПОГРУЗЧИКОВ ПРИ РАБОТЕ В КАЧЕСТВЕ ВЫЕМОЧНО-ТРАНСПОРТНЫХ МАШИН

Журавлев Артём Геннадиевич¹,
juravlev@igduran.ru

Черных Владимир Владимирович¹,
chernyh@igduran.ru

¹ Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук,
Россия, 620219, г. Екатеринбург, ул. Мамина-Сибиряка, 58.

Актуальность повышения эффективности разработки месторождений полезных ископаемых требует приближения наиболее экономичного магистрального транспорта к рабочей зоне карьера. При многоэтапной разработке сложноструктурных месторождений глубокими карьерами с относительно небольшими их размерами в плане (примерами служат золоторудные, меднорудные, алмазорудные карьеры) может быть целесообразным объединить функции выемки и транспортирования в одной машине.

Цель: определение граничных технико-экономических показателей погрузчиков при использовании в качестве выемочно-транспортных машин. Граничными являются показатели экскаваторно-автомобильного комплекса в идентичных условиях.

Объекты: современные высокопроизводительные погрузчики с вместимостью ковша 10–40 м³ при грузоподъемности рабочего оборудования 20–72 т и мощностью двигателя от 521 до 1715 кВт, экскаваторно-автомобильный комплекс на базе электромеханических экскаваторов-мехлопат с вместимостью ковша 12 м³ и автосамосвалов БелАЗ-7513 грузоподъемностью 136 т.

Методы. Расчёты технико-экономических показателей выполнены по известным методикам, описанным в научно-технической литературе, для машин циклического действия и фронтальных погрузчиков. Условия работы оборудования, принятые при расчётах, находятся в диапазоне рациональных для экскаваторно-автомобильного комплекса, что позволяет максимально эффективно сравнить их с фронтальными погрузчиками.

Результаты. Обобщены расчетные данные о производительности, себестоимости выемочно-доставочных работ погрузчиками в зависимости от дальности транспортирования, высоты подъема, годовой производительности по горной массе с учетом типоразмера погрузчиков (вместимости ковша). Выявлены граничные параметры предпочтительных условий применения погрузчиков в качестве выемочно-транспортных машин в сравнении с экскаваторно-автомобильными комплексами. Сделан вывод о целесообразности продолжения исследований по обоснованию параметров специальных выемочно-транспортных машин.

Ключевые слова:

Сборочный карьерный транспорт, фронтальный погрузчик, выемочно-транспортная машина, технико-экономические показатели, экскаваторно-автомобильный комплекс.

Введение

Необходимость повышения эффективности разработки месторождений полезных ископаемых требует приближения параметров транспорта к значениям, обеспечивающим минимальный уровень затрат на всем жизненном цикле [1, 2].

Развитие инновационных решений [3] позволит достичь более высокой эффективности при магистральном транспортировании горной массы. В конечном итоге эти требования сводятся к максимальному приближению магистрального звена транспортной системы к рабочей зоне, что сокращает плечо откатки для сборочного звена транспорта. Сборочное же звено сегодня практически безальтернативно формируется на базе автомобильного транспорта, который характеризуется высокими эксплуатационными затратами.

Учитывая вышесказанное, в условиях стесненной рабочей зоны при отработке глубинной части карьера возникает необходимость совмещения функций выемочно-погрузочного и транспортного оборудования в одном комплексе. Такой комплекс может быть реализован на базе специальных выемочно-транспортных машин (ВТМ), способных осуществлять как выемку

горной массы в забое, так и ее транспортирование на расстояние до 2–3 км.

Сравнение технологических особенностей ВТМ и экскаваторно-автомобильного комплекса (ЭАК) приведено в таблице.

ВТМ ввиду объединения функций будут по предварительным оценкам иметь значительную массу, а значит, и больший коэффициент тары в сравнении с карьерными автосамосвалами, что ограничивает экономически эффективное расстояние. Поэтому данные машины должны использоваться в качестве сборочного звена с последующей перегрузкой в магистральный транспорт, например: стационарный подъемник [3], автопоезд, работающий на доставке по тоннельным съездам [4] и т. п.

Разработка компоновочных решений ВТМ и прогнозирование их технико-экономических показателей для оценки области применения является трудоемкой задачей. Поэтому на предварительном этапе важно выполнить укрупненную оценку возможного эффекта от применения такого типа машин в сравнении с традиционной технологией, базирующейся на экскаваторно-автомобильных комплексах (ЭАК).

Таблица. Сравнение технологических особенностей выемочно-транспортных машин и экскаваторно-автомобильного комплекса

Table. Comparison of technological features of excavation and transport machines and excavator and automobile complex

Свойство, фактор Property, factor	Выемочно-транспортная машина (прототип – фронтальный погрузчик) Excavation and transportation machine (prototype – front loader)	Экскаваторно-автомобильный комплекс Excavator-automobile complex
Полные затраты Total costs	Ниже, чем на ЭАК, при небольших расстояниях в связи с: 1) отсутствием необходимости проводить кабельную инфраструктуру; 2) отсутствием дорогостоящего экскаватора Lower than for EAC on small distances due to the absence of: 1) need to provide cable infrastructure; 2) expensive excavator.	Ниже, чем на ВТМ, при номинальной производительности в связи: 1) высокой единичной производительностью машин; 2) оптимальным коэффициентом тары автосамосвалов и тягово-динамических характеристик для транспортирования. Lower than for ETM with nominal productivity due to: 1) high unit productivity of machines; 2) optimal coefficient of dump truck containers and traction-dynamic characteristics for transportation
Зависимость удельной себестоимости (р./т, р./м ³) от объема выемки Dependence of the unit cost (rub/t, rub/m ³) on the volume of excavation	Высокая: при значительных объемах себестоимость существенно возрастает в связи с пропорциональным ростом количества машин, операторов, гаражно-ремонтного хозяйства High: with significant volumes the cost increases significantly due to the proportional increase in the number of machines, operators, garage repair facilities	Возрастает при падении объемов в связи с непродуктивным использованием оборудования и уменьшается с выходом на расчетную производительность Increases at volume reduction due to unproductive use of equipment and decreases with the output volume of the calculated productivity
Производительность Efficiency	Ограничена в связи с: 1) совмещением функций в одной машине и сложностью варьировать технические параметры под изменяющиеся горнотехнические условия; 2) невысокой скоростью движения. Limited due to: 1) combination of functions in one machine and the difficulty of varying their technical parameters for changing mining conditions; 2) restricted travelling speed.	1) Обеспечивается оптимум технической производительности комплекса за счет разделения функций экскавации и транспортирования. 2) Можно отдельно подобрать рациональные по технологическим параметрам и производительности машины. 1) Optimum technical performance of the complex is ensured by separating the functions of excavation and transportation. 2) It is possible to select machines separately, rational in terms of technological parameters and machine performance.
Ограничения по конструктивным особенностям Limitations on design features	1) Высокий коэффициент тары в связи с конструктивным совмещением функций выемочной и транспортной машин. 2) Ограниченная скорость в связи с необходимостью экономичной работы в режиме выемки из забоя при значительной силе тяги (либо необходимость установки КПП, что увеличивает коэффициент тары и стоимость) 1) High payload ratio due to the constructive combination of the functions of the dredging and transport machines. 2) Limited speed due to the need for economical operation in the dredging mode with a significant thrust force (or the need to install a gearbox, which increases the payload ratio and costs).	Низкая скорость перемещения экскаватора Low speed of excavator movement
Безопасность Safety	Выше, чем для экскаваторов, в связи с отсутствием постоянно находящихся машин в забое, высокой динамикой машин, их способностью оперативно выйти из опасной зоны Higher due to the absence of permanently located machines in the face, high dynamics of machines, and the ability to quickly get out of the danger zone	Низкая при ведении выемки в забоях в опасных условиях (зоны с низкой устойчивостью, формирование совмещенных уступов в стесненных условиях и др.) Low when excavating in the faces with dangerous conditions (zones of low stability, formation of combined ledges in confined spaces, etc.)
Технологическая гибкость при многозабойной селективной выемке Technological flexibility in multi-face selective excavation	Высокая адаптивность в связи с возможностью прибытия ВТМ в любой забой в каждый из рейсов. Возможность селективной выемки, в том числе в пределах каждого забоя, включая отработку пропластков, приконтурной зоны High adaptability due to the possibility of arrival of ETM in any face in each of the hauls. Possibility of selective excavation, including within each face, embracing the development of interlayers and of the contour zone	Низкая в связи с длительностью операций перегона, необходимостью держать соответствующее количество экскаваторов в рабочей зоне при необходимости шихтовки. Селективная выемка более качественно осуществляется гидравлическими экскаваторами Low adaptability due to the duration of the ferrying operations, the need to keep an appropriate number of excavators in the working area if blending is necessary. Selective excavation is carried out more efficiently by hydraulic excavators

Фундаментальные труды по технологии, экономической эффективности и области применения фронтальных колесных погрузчиков выполнены К.Н. Трубецким [5]. В части использования погрузчиков с вместимостью ковша до 10 м^3 в качестве выемочно-доставочных машин установлены условия их эффективного применения в сравнении с экскаваторно-автомобильными комплексами, характеризующиеся следующими параметрами:

- дальность транспортирования в зависимости от типа и качества дорожного покрытия до 800–1500 м;
- годовой объем перевозок до 3 млн т.

Учитывая значительное развитие конструкций фронтальных погрузчиков за последние три десятилетия, в частности постановку на серийное производство погрузчиков с ковшами $20\text{--}40 \text{ м}^3$, указанные данные требуют актуализации и расширения охватываемого типоразмерного ряда.

Данные современных исследований [6–17] показывают, что погрузчики позволяют обеспечить преимущества перед экскаваторами в ряде случаев: при ограниченной производственной программе, высоких требованиях к селективности выемки, специфических условиях ведения выемочных работ, требующих высокой мобильности. Хотя чаще всего погрузчики применяются на рудных складах для погрузки транспорта или выемки из штабелей и загрузки в приемные бункеры ДОФ руды. Большой объем современных работ [8, 11, 13, 14], публикуемых в печати, ориентирован на совершенствование конструкций погрузчиков, обеспечивающих экономичность, производительность, надежность и долговечность, а также автоматизацию с выходом на полную автономность (роботизацию). Это создает основы для дальнейшего

улучшения технико-экономических показателей погрузчиков.

Таким образом, имеющиеся в научно-технической литературе данные не позволяют однозначно определить целесообразность применения ВТМ, учитывая оборудование их ковшами или грузовыми платформами большой вместимости $40\text{--}60 \text{ м}^3$. Это требует проведения специальных расчетов.

Методы исследования

Для оценки были выполнены технико-экономические расчеты, в которых в качестве прототипа выбраны современные крупнотоннажные погрузчики с вместимостью ковша $10\text{--}40 \text{ м}^3$ при грузоподъемности рабочего оборудования $20\text{--}72 \text{ т}$ (рис. 1).

Производительность погрузчиков рассчитывалась исходя из времени на операции наполнения ковша, разгрузки, определенного по данным хронометражных наблюдений, а также времени движения, рассчитанного исходя из тягово-динамической характеристики каждого конкретного погрузчика.

Экономические расчеты выполнены в ценах 2020 г. Методика расчета и базовые закономерности приведены в работах [18, 19]. В качестве базового варианта принят ЭАК, состоящий из электромеханических экскаваторов-мехлопат с вместимостью ковша 12 м^3 и автосамосвалов БелАЗ-7513 грузоподъемностью 136 т. Эксплуатационные показатели работы карьерных автосамосвалов определялись на основе компьютерного моделирования. Расчеты по всем вариантам выполнены для рудных карьеров, разрабатываемых по углубочной системе. Насыпная плотность горной массы после взрывания принята $2\text{--}2,2 \text{ т/м}^3$. Выемка валовая.



Рис. 1. Технологическая схема работы выемочно-доставочного комплекса на базе фронтальных колесных погрузчиков
Fig. 1. Technological scheme of the work of the removal and delivery complex based on front wheel loaders

Результаты и их анализ

Первичный анализ построен на установлении закономерностей технико-экономических показателей фронтальных погрузчиков, используемых в режиме ВТМ от основных горнотехнических факторов: расстояния транспортирования, высоты подъема, объема перемещаемой горной массы. На рис. 2 приведены зависимости технической производительности погрузчиков с разной вместимостью ковша. Видно, что с ростом расстояния производительность существенно падает (например, в диапазоне расстояний от 0,5 до 1 км в 2 раза), что объясняется ограниченной максимальной технической скоростью движения. Влия-

ние высоты подъема не столь существенно ввиду значительной удельной мощности.

Себестоимость функционирования погрузчиков различного типоразмера в режиме ВТМ, приведенная к 1 т горной массы, представлена на рис. 3. Видно, что затраты растут пропорционально расстоянию и высоте подъема, при этом в области наиболее вероятного экономического преимущества погрузчиков при дальности транспортирования $0,5\text{--}2 \text{ км}$ себестоимость составляет $20\text{--}75 \text{ р./т}$. При малых расстояниях и значительной высоте подъема, соотношение которых определяется средневзвешенным уклоном трассы транспортирования $7\text{--}9 \%$ (уклон съездов до 12%), себестоимость резко возрастает, что отражено на графиках рис. 3 возрастающей кривой.

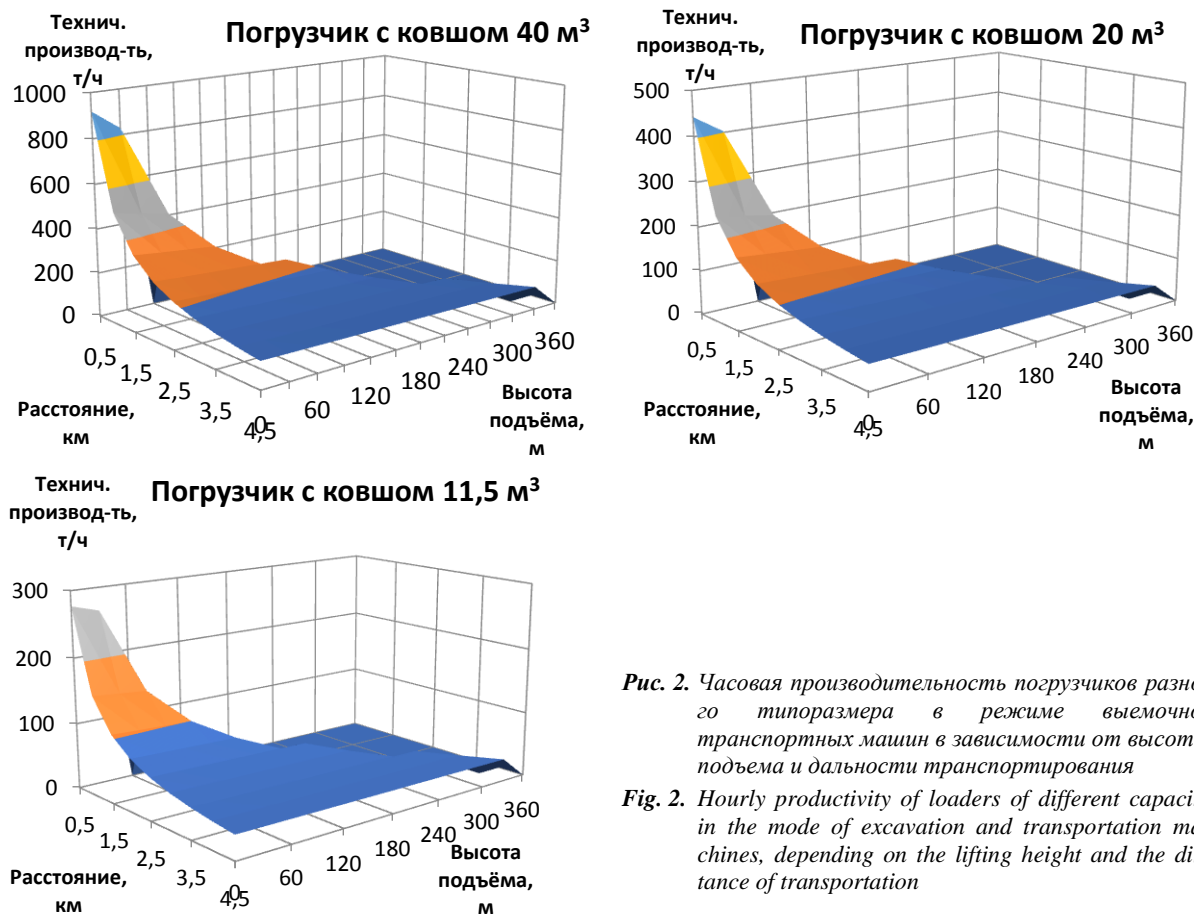


Рис. 2. Часовая производительность погрузчиков разного типоразмера в режиме выемочно-транспортных машин в зависимости от высоты подъёма и дальности транспортирования

Fig. 2. Hourly productivity of loaders of different capacity in the mode of excavation and transportation machines, depending on the lifting height and the distance of transportation

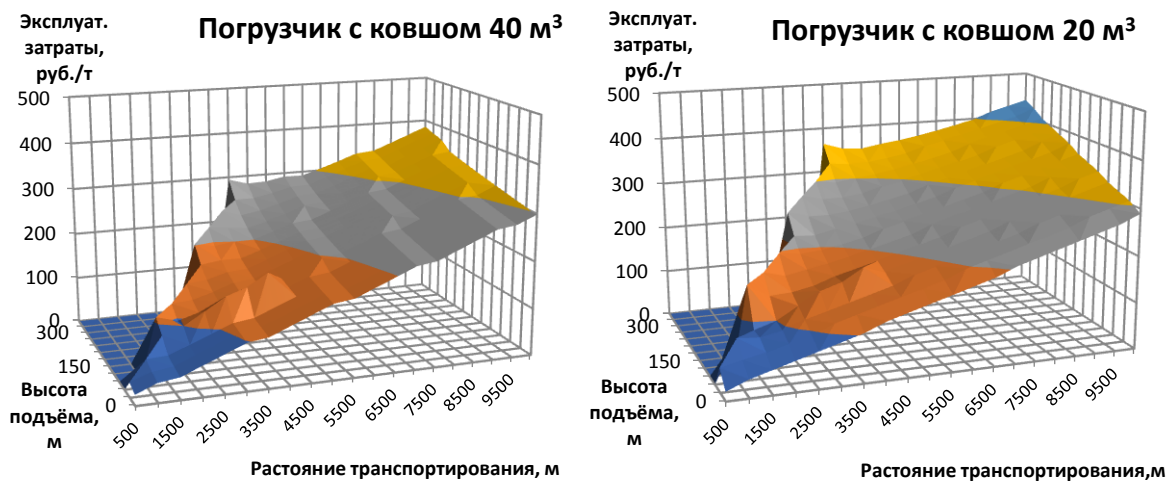


Рис. 3. Зависимость эксплуатационных затрат на работу погрузчиков от условий транспортирования

Fig. 3. Dependence of operating costs for the work of loaders on the conditions of transportation

Вторая часть исследования построена на сопоставлении затрат по вариантам «ЭАК» и «Погрузчики». Себестоимость экскавации для варианта «ЭАК» принималась 48 р./м³. Из рис. 4 видно, что существует область, где затраты на погрузчики ниже, чем на ЭАК. Она характеризуется расстоянием транспортирования до 1,0–1,3 км и высотой подъёма не более 60–65 м в зависимости сопутствующих факторов. По результатам расчетов отмечено, что с ростом высоты подъёма за-

траты по варианту применения погрузчиков растут в сравнении с ЭАК, а эффективное расстояние уменьшается. При высотах более 70–80 м не наблюдается пересечения с кривой затрат ЭАК, то есть транспортирование погрузчиками при любом расстоянии затратнее (рис. 4, б). Это объясняется существенным ростом затрат на горюче-смазочные материалы ввиду работы энергосилового устройства в сильно нагруженном режиме в условиях повышенных уклонов.

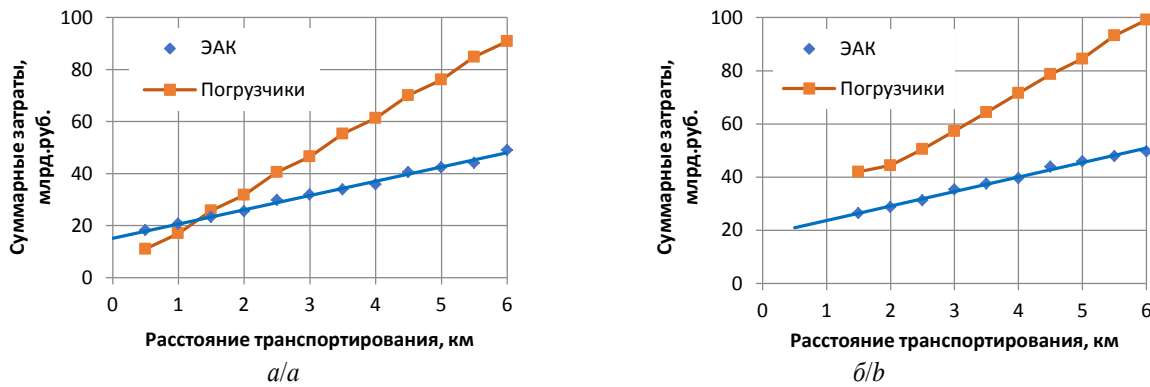


Рис. 4. Сопоставление суммарных затрат на выемку и транспортирование горной массы за 10 лет эксплуатации по вариантам «ЭАК» и «Погрузчики» вместимостью ковша 40 м^3 при производительности 10 млн т/год (капитальные + эксплуатационные затраты без дисконтирования) при высоте подъема: а) 0 м; б) 90 м

Fig. 4. Comparison of the total costs of excavation and transportation of rock mass for 10 years of operation according to the variants «EAC» (excavator and automobile complex) and «Loaders» with a bucket capacity of 40 м^3 at a productivity of 10 million tons/year (capital + operating costs without discounting) at a lifting height of: а) 0 m; б) 90 m

Следовательно:

- при создании специализированных ВТМ необходимо обеспечить экономичный режим работы не только на малых, но и на стандартных для транспортных съездов уклонах при длительном движении;
- применение ВТМ рационально в ограниченной рабочей зоне в пределах 2–4 горизонтов по высоте с последующей перегрузкой в магистральный транспорт.

Обработка результатов расчетов и обобщение точек пересечения по совокупности графиков, аналогичных рис. 4, для множества высот подъема, дальности транспортирования и периода оценки позволило отобразить графически область технико-экономического преимущества погрузчиков, эксплуатируемых в качестве выемочно-доставочных машин, в сравнении с ЭАК (рис. 5). Сверху область ограничена тягово-динамическими характеристиками и определяется предельным уклоном, при котором погрузчик способен двигаться с рабочей скоростью (не ниже 8–10 км/ч) с приемлемым коэффициентом полезного действия трансмиссии, который существенно падает при значительной силе тяги на колесах. Расчетами установлено,

что средневзвешенный уклон целесообразно ограничить на уровне 8 %, что соответствует руководящему уклону отдельных съездов 10–11 %. Отметим, что ряд погрузчиков по своим характеристикам способны преодолевать больший уклон, однако в этом случае следует рассматривать специальные схемы их работы и сравнивать с соответствующими базовыми вариантами технологических комплексов машин (например, экскаваторы и полноприводные пневмоколесные либо гусеничные самосвалы, способные устойчиво работать на съездах с уклонами до 25 % и более [20]).

Учитывая, что с ростом расстояния затраты на работу погрузчиков существенно растут, предельное расстояние ограничивается уровнем затрат и соответствует кривой равенства затрат между вариантами погрузчиков и ЭАК. Отметим, что период оценки оказывает некоторое влияние на границу по расстоянию транспортирования, что связано с разным уровнем расходов на обновление парка машин (с одной стороны погрузчики, с другой стороны – экскаваторы и автосамосвалы) и разными сроками службы, но кардинально картину не меняет.

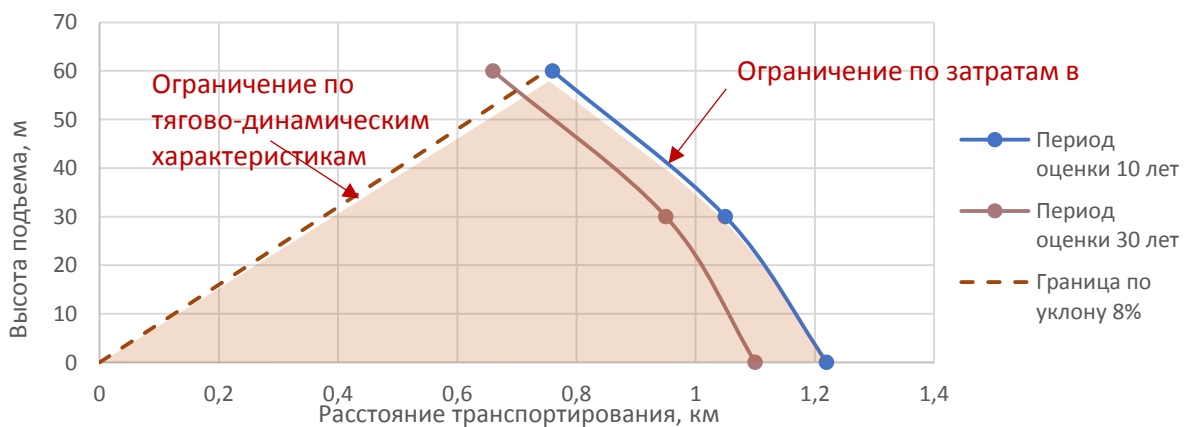


Рис. 5. Область эффективного применения погрузчиков с вместимостью ковша 40 м^3 при грузоподъемности 72 т в качестве погрузочно-доставочных машин

Fig. 5. Area of effective use of loaders with a bucket capacity of 40 м^3 with a load capacity of 72 tons as loading and delivery machines

Заметное влияние на преимущество ВТМ по технико-экономическим показателям оказывает себестоимость экскавации ЭАК. Она в свою очередь зависит от факторов, определяющих эффективную работу ЭАК, прежде всего: годовой производительности, рационального типоразмера экскаваторов применительно к горнотехническим условиям.

На рис. 6 показана разница расчетных затрат на выемку и транспортирование до перегрузки на магистральный транспорт между погрузчиками и ЭАК. Расчет выполнен для объема перевозок 5–10 млн

т/год. Рассматривается разный уровень себестоимости экскавации, что позволяет учесть варианты применяемых экскаваторов (электромеханические, гидравлические, разной вместимости ковша), а также регион (как правило, для удаленных районов с неразвитой инфраструктурой, а также месторождений, обрабатываемых в северных условиях, себестоимость высокая). Видно, что изменение себестоимости экскавации ЭАК от 40 до 100 р./м³ (в 2,5 раза) обеспечивает рост эффективной дальности транспортирования ВТМ с 0,6 до 2,15 км (в 3,5 раза).

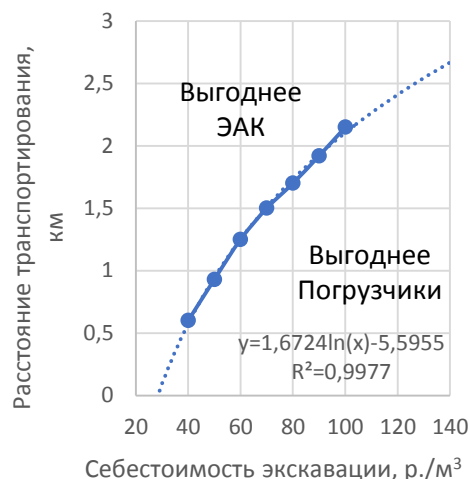
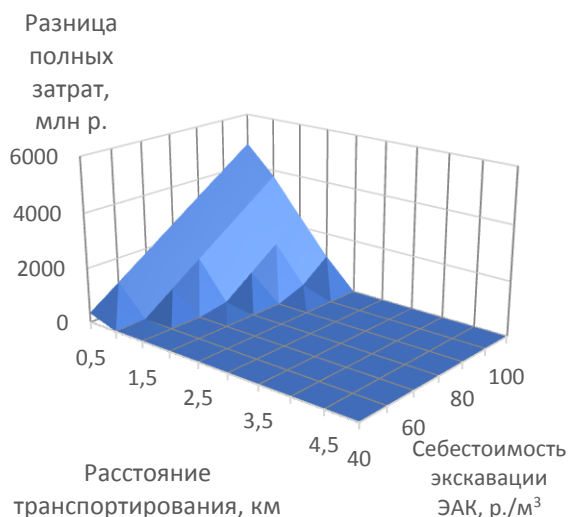


Рис. 6. Сокращение суммарных затрат при применении погрузчиков с вместимостью ковша 40 м³ в сравнении с ЭАК за 10 лет при различной себестоимости экскавации ЭАК, высоте подъема при транспортировании 30 м: а) разница затрат между вариантами «Погрузчики» и «ЭАК»; б) граница эффективного применения погрузчиков

Fig. 6. Reduction of total costs when using loaders with a bucket capacity of 40 m³ in comparison with EAC for 10 years at different cost of EAC excavation, lifting height of 30 m while transportation: a) difference in costs between the variants «Loaders» and «EAC»; b) boundary of the effective use of loaders

Обработка результатов расчетов позволила определить границу области более экономичного применения комплекса погрузчиков с вместимостью ковша 40 м³ (рис. 6, б). Основной кривой с маркерами точек обозначена расчетная граница, а пунктиром – экстраполяция данной границы (аппроксимирующее уравнение приведено на графике). Видно, что замена ЭАК на погрузчики при себестоимости экскавации ниже 30 р./м³ неэффективна.

Стоит отметить, что речь в данном случае идет только о сравнительно экономической неэффективности. На практике могут встречаться условия, при которых применение погрузчиков целесообразно по горно-технологическим соображениям, тогда область эффективного применения будет определяться положительным балансом затрат и выручки.

Примененная в расчетах методика не позволяет установить влияние годовой производительности на оптимизацию расходов ЭАК. Поэтому такое влияние оценивалось экспертно по аналогам. Очевидно, что при значительной годовой программе горных работ парк погрузчиков заметно возрастает (равно как и затраты на него), а вот ЭАК, напротив, благодаря выходу на высокую производительность характеризуется

понижением себестоимости на 1 т перемещаемой горной массы. В итоге ограничение на эффективное применение погрузчиков в качестве ВТМ оценивается в 15 млн т/год при области наибольшей эффективности в пределах 2–10 млн т/год.

Отметим, что представленные расчеты для конкретных вариантов без оптимизации:

- погрузчики с вместимостью ковша 40 м³;
- ЭАК в составе автосамосвалов грузоподъемностью 136 т и экскаватора-мехлопаты электромеханического с ковшом 12 м³.

Поэтому установленная граница экономичного применения погрузчиков в качестве ВТМ является ориентировочной и может смещаться в зависимости от конкретных условий как в сторону сужения, так и в сторону расширения области.

Выводы

1. В условиях стесненной рабочей зоны при развитии глубоких карьеров возможно применение технологии с минимизацией дальности транспортирования сборочным транспортом и приближении магистрального транспорта специального типа (канатные подъемники или иное) к рабочей

зоне. Возникает необходимость совмещения функций выемочно-погрузочного и транспортного оборудования в одном комплексе. Такой комплекс может быть реализован на базе специальных выемочно-транспортных машин, способных осуществлять как выемку горной массы в забое, так и транспортирование на расстояние до 2–3 км при незначительной высоте подъема.

2. Установлена укрупненно область эффективного применения современных мощных фронтальных колесных погрузчиков с ковшем 20–40 м³ в качестве выемочно-транспортных машин при открытой разработке месторождений на незначительное расстояние при ограниченном годовом объеме перевозок. Она характеризуется:

- дальностью транспортирования не более 1,2–2,5 км в зависимости от себестоимости выполнения работ, обусловленной региональными коэффициентами, затратами на доставку материалов, оборудования, запасных частей, стоимостью топлива;
- высотой подъема не более 60–90 м;
- средневзвешенным уклоном трассы не более 8 %;
- годовым объемом работ комплекса до 10–15 млн т.

Отметим, что указаны граничные значения условий применения, наибольшую эффективность погрузчики показывают при дальности транспортирования до 500–1000 м.

3. Технологические условия эффективного применения погрузчиков в качестве ВТМ:

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Яковлев В.Л. Исследование переходных процессов – новое направление в развитии методологии комплексного освоения георесурсов. – Екатеринбург: УрО РАН, 2019. – 284 с.
2. Журавлев А.Г. Вопросы оптимизации параметров транспортных систем карьеров // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – № 3-1. – С. 583–601. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-31-0-584-601
3. Чендырев М.А., Журавлев А.Г. Обоснование эффективных условий применения карьерных наклонных канатных подъемников на базе компьютерного моделирования // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 5-2. – С. 309–321. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-52-0-309.
4. Технологические решения по вскрытию и отработке глубоких горизонтов Нюрбинского карьера АК «АЛРОСА» / А.Н. Акишев, Ю.И. Лель, Д.Х. Ильбульдин, О.В. Мусихина, И.А. Глебов // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2017. – № 7. – С. 4–12.
5. Трубецкой К.Н. Технология применения и параметры карьерных погрузчиков. – М.: Недра, 1985. – 264 с.
6. Sebeom Park, Yosoon Choi, Han-su Park. Optimization of truck-loader haulage systems in an underground mine using simulation methods // Geosystem Engineering. – 2016. – V. 19:5. – P. 222–231. DOI: 10.1080/12269328.2016.1176538.
7. Burt C.N., Caccetta L. Match factor for heterogeneous truck and loader fleets, International Journal of Mining // Reclamation and Environment. – 2007. – V. 21:4. – P. 262–270. DOI: 10.1080/17480930701388606.
8. Hassanean S.H.J., Weizhuo Lu, Olofsson Th. Determining the environmental impact of material hauling with wheel loaders during earthmoving operations // Journal of the Air & Waste Management Association. – 2019. – V. 69 – P. 1195–1214. DOI: 10.1080/10962247.2019.1640805.

- селективность выемки, необходимость многозабойного усреднения с подшихтовкой или отдельной выдачи руды по сортам;
- необходимость поочередного ведения горных работ на разных горизонтах с частыми перегонами выемочных машин;
- работа в зонах высокой опасности вывалов и обрушений (формирование сверхвысоких уступов, доработка нижних горизонтов при специальных схемах вскрытия (крутонаклонными съездами, тоннельными съездами) и др.

4. Учитывая полученную по результатам расчетов экономию от применения фронтальных погрузчиков на выемочно-транспортных работах целесообразно продолжить исследования и обосновать технические параметры специальных выемочно-транспортных машин, базируясь на требуемых технологических показателях.

Оценку эффективности таких конструктивных и технологических решений необходимо выполнять по технико-экономическим показателям, сопоставляя варианты:

- «только ВТМ» и «экскаваторно-автомобильный комплекс»;
- «только ВТМ» и «комплекс погрузчик-автосамосвал».

Исследования выполнены в рамках Государственного задания № 075-00412-22 ПР. Методологические основы стратегии комплексного освоения запасов месторождений твердых полезных ископаемых в динамике развития горнотехнических систем (FUWE-2022-0005), рег. № 1021062010531-8-1.5.1

9. Чебан А.Ю., Секисов Г.В. Обоснование использования комбинированной подготовки к селективной выемке руд сложноструктурных месторождений // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2020. – № 3. – С. 4–12.
10. Зырянов И.В., Акишев А.Н., Бондаренко И.Ф. Совершенствование добычи и переработки алмазосодержащих руд. – Якутск: ИД СВФУ, 2020. – 720 с.
11. Intelligent maintenance decision system for high speed loader executing agencies based on FT A and FEMCA / F. Wang, Z. Wang, W. Wang, X. Zhang // 2020 IEEE International Conference on Information Technology, Big Data and Artificial Intelligence (ICIBA). – 2020. – P. 1295–1299. DOI: 10.1109/ICIBA50161.2020.9277429.
12. Site operation strategy for wheel loader/truck loading and transportation cycle / F. Wang, Q. Wen, X. Xu, B. Xu, Z. Sun // IEEE Transactions on Vehicular Technology. – 2021. – V. 70. – № 5. – P. 4129–4138. DOI: 10.1109/TVT.2021.3070394.
13. Tebaldi D., Zanasi R. Modeling control and simulation of a power-split hybrid wheel loader // 2021 29th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED). – 2021. – P. 465–471. DOI: 10.1109/MED51440.2021.9480213.
14. Improving the fuel efficiency of compact wheel loader with a series hydraulic hybrid powertrain / Q. Wen, F. Wang, B. Xu, Z. Sun // IEEE Transactions on Vehicular Technology. – 2020. – V. 69. – № 10. – P. 10700–10709. DOI: 10.1109/TVT.2020.3006155.
15. Курехин Е.В. Обоснование технологии разработки взорванных пород с применением выемочно-погрузочных комплексов и автомобильного транспорта для разрезов малой производственной мощности // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2015. – № S45-1. – С. 502–518.
16. Singh S.P., Narendrula R. Factors affecting the productivity of loaders in surface mines // International Journal of Mining,

- Reclamation and Environment. – 2020. – V. 20:1. – P. 20–32. DOI: 10.1080/13895260500261574/.
17. Журавлев А.Г., Черных В.В. Техничко-экономические расчеты применения погрузчиков в качестве выемочно-транспортного оборудования карьеров // Проблемы недропользования. – 2021. – № 1. – С. 45–56. DOI: 10.25635/2313-1586.2021.01.045.
18. Фурин В.О. Обоснование технологических параметров углубочного комплекса для доработки крутопадающих месторождений: дис. ... канд. техн. наук. – Екатеринбург, 2009. – 155 с.
19. Журавлев А.Г., Скороходов А.В. К вопросу обоснования производительности экскаваторно-автомобильных комплексов методом компьютерного моделирования // Проблемы недропользования. – 2015. – № 2. – С. 53–60. DOI: 10.18454/2313-1586.2015.02.053
20. Глебов А.В. Технологические особенности освоения месторождений твердых полезных ископаемых с использованием шарнирно-сочлененных самосвалов // Наука и техника. – 2018. – Т. 17. – № 3. – С. 238–245. DOI: 10.21122/2227-1031-2018-17-3-238-245.

Поступила: 14.01.2022 г.

Информация об авторах

Журавлев А.Г., кандидат технических наук, заведующий лабораторией транспортных систем карьеров и геотехники Института горного дела Уральского отделения Российской академии наук.

Черных В.В., младший научный сотрудник лаборатории транспортных систем карьеров и геотехники Института горного дела Уральского отделения Российской академии наук.

UDC 622.684

BOUNDARY TECHNICAL AND ECONOMIC INDICATORS OF THE APPLICABILITY FOR FRONT LOADERS WORKING AS EXCAVATION AND TRANSPORTATION MACHINES

Artem G. Zhuravlev¹,
juravlev@igduran.ru

Vladimir V. Chernykh¹,
chernyh@igduran.ru

¹ Institute of Mining of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
58, Mamin-Sibiryak street, Ekaterinburg, 620219, Russia.

The relevance of increasing efficiency of mineral deposits mining requires the approach of the most economical mainline transport to the working area of the quarry. At multi-stage development of complex-structured deposits by deep quarries with relatively small sizes in plan (for example, gold, copper, and diamond ore quarries), it may be advisable to combine the functions of excavation and transportation in one machine.

Objective: to determine the boundary technical and economic indicators of loaders when used both as excavation machines and transport vehicles. The indicators of the excavator-automobile complex in identical conditions are the boundary ones.

Objects: modern high-performance loaders with bucket capacity of 10–40 m³ when lifting capacity of working equipment is of 20–72 tons and engine power is from 521 to 1715 kW, an excavator-automobile complex based on electromechanical excavators-shovels with bucket capacity of 12 m³, and dump trucks BelAZ-7513 with lifting capacity of 136 tons.

Methods. The calculations of technical and economic indicators were carried out according to well-known methods described in the scientific and technical literature for cyclic action machines and front loaders. The operating conditions of the equipment are considered in the calculations belong in the range of rational for the excavator-automobile complex, which allows us to compare them with front-end loaders as efficiently as possible.

Results. The calculated data on productivity, the cost of mining and transporting work executed by the loaders, depending on the distance of delivery, lifting height, annual productivity by rock mass, taking into account the standard type and size of the loaders (bucket capacity), are summarized. The boundary parameters of the preferred conditions for the use of loaders as excavation and transportation machines in comparison with excavator-automobile complexes are revealed. The paper gives the conclusion about the expediency of continuing research to substantiate the parameters of special excavation and transportation machines.

Key words:

Assembly quarry transport, front loader, excavation and transportation machine, technical and economic indicators, excavator-automobile complex.

The research was carried out within the framework of the State Task no. 075-00412-22 PR. Methodological foundations of the strategy for integrated development of reserves of solid mineral deposits in the dynamic of development of mining systems (FU WE-2022-0005), reg. no. 1021062010531-8-1.5.1.

REFERENCES

1. Yakovlev V.L. *Kerogen: issledovanie perekhodnykh protsessov – novoe napravlenie v razvitiie metodologii kompleksnogo osvoeniya georesursov* [Kerogen: the study of transients is a new direction in the development of the methodology of integrated exploration of geo-resources]. Yekaterinburg, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences Publ., 2019. 284 p.
2. Zhuravlev A.G. The issues of optimization parameters of quarry transport systems. *Mining informational and Analytical Bulletin*, 2020, no. 3-1, pp. 583–601. In Rus. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-31-0-584-601
3. Zhuravlev A.G., Chendyrev M.A. Computer modeling-based substantiation of effective application conditions for inclined rope hoists in open pit mines. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.*, 2021, no. 5-2, pp. 309–321. In Rus. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_52_0_309.
4. Akishev A.N., Lel Yu.I., Ilbuldin D.Kh., Musikhina O.V., Glebov I.A. Technological solutions for the Alrosa group nyurbinsky open pit depp horizons exposing and processing *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal*, 2017, no. 7, pp. 4–12. In Rus.
5. Trubetskoy K.N. *Kerogen: tekhnologiya primeneniya i parametry karemnykh pogruchikov* [Kerogen: technology of application and parameters of quarry loaders]. Moscow, Nedra Publ., 1985. 264 p.
6. Sebeom Park, Yosoon Choi, Han-su Park. Optimization of truck-loader haulage systems in an underground mine using simulation methods. *Geosystem Engineering*, 2016, vol. 19:5, pp. 222–231. DOI: 10.1080/12269328.2016.1176538.
7. Burt C.N., Caccetta L. Match factor for heterogeneous truck and loader fleets, *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 2007, vol. 21:4, pp. 262–270. DOI: 10.1080/17480930701388606.
8. Hassanean S.H.J., Weizhuo Lu, Olofsson Th. Determining the environmental impact of material hauling with wheel loaders during earthmoving operations. *Journal of the Air & Waste*, 2019, vol. 69, pp. 1195–1214. DOI: 10.1080/10962247.2019.1640805.
9. Cheban A.Yu., Sekisov G.V. Rationale for the use of a combined preparation for selective extraction of ores from complex structure deposits. *Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University*, 2020, vol. 18, no. 3, pp. 4–12. In Rus. DOI: 10.18503/1995-2732-2020-18-3-4-12
10. Zyryanov I.V., Akishev A.N., Bondarenko I.F. *Kerogen: sovershenstvovanie dobychi i pererabotkialmazosoderzhashchikh rud* [Kerogen: improvement of mining and processing of diamond-bearing ores]. Yakutsk, NEFU Publ. house, 2020. 720 p.
11. Wang F., Wang Z., Wang W., Zhang X. Intelligent maintenance decision system for high speed loader executing agencies based on FT A and FEMCA. *IEEE International Conference on Information Technology, Big Data and Artificial Intelligence (ICIBA)*. 2020. pp. 1295–1299. DOI: 10.1109/ICIBA50161.2020.9277429.
12. Wang F., Wen Q., Xu X., Xu B., Sun Z. Site operation strategy for wheel loader/truck loading and transportation cycle. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, May 2021, vol. 70, no. 5, pp. 4129–4138. DOI: 10.1109/TVT.2021.3070394.

13. Tebaldi D., Zanasi R. Modeling control and simulation of a power-split hybrid wheel loader 29th *Mediterranean Conference on Control and Automation (MED)*, 2021. pp. 465–471. DOI: 10.1109/MED51440.2021.9480213.
14. Wen Q., Wang F., Xu B., Sun Z. Improving the fuel efficiency of compact wheel loader with a series hydraulic hybrid powertrain. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2020, vol. 69, no. 10, pp. 10700–10709. DOI: 10.1109/TVT.2020.3006155.
15. Kourekhin E.V. Substantiation of technology for development of broken rock utilizing complex surface mining equipment and motor transport for open-pit mines of small capacity. *Mining Information and Analytical Bulletin*, 2015, no. S45-1, pp. 502–518. In Rus.
16. Singh S.P., Narendrula R. Factors affecting the productivity of loaders in surface mines. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 2006, vol. 20:1, pp. 20–32. DOI: 10.1080/13895260500261574.
17. Zhuravlev A.G., Chernykh V.V. Technical and economic calculations of the use of loaders as excavation and transportation equipment of open pits. *Problemy nedropolzovaniya*, 2021, no. 1, pp. 45–56. In Rus. DOI: 10.25635/2313-1586.2021.01.045.
18. Furin V.O. *Kerogen: obosnovanie tekhnologicheskikh parametrov uglubochnogo kompleksa dlya dorabotki krutopadayushchikh mestorozhdenii*. Dis. Kand. nauk [Kerogen: justification of technological parameters of the deepening complex for the completion of steep-falling deposits. Cand. Diss.]. Yekaterinburg, 2009. 155 p.
19. Zhuravlev A.G., Skorokhodov A.V. Kerogen: on the issue of substantiating the efficiency of excavator-automobile complexes by computer modeling. *Problemy nedropolzovaniya*, 2015, no. 2, pp. 53–60. In Rus. DOI: 10.18454/23131586.2015.02.053)
20. Glebov A.V. Technological peculiar features in deposit opening of solid minerals while using articulated dump trucks. *Science and Technique*, 2018, vol. 17 (3), pp. 238–245. In Rus. DOI: 10.21122/2227-1031-2018-17-3-238-245

Received: 14 January 2022.

Information about the authors

Artem G. Zhuravlev, Cand. Sc., head of the Laboratory of Quarry Transport Systems and Geotechnics, Institute of Mining of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences.

Vladimir V. Chernykh, junior researcher, Institute of Mining of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences.

УДК 621.313.04

МЕТОД ДИАГНОСТИКИ ОБРЫВОВ СТЕРЖНЕЙ РОТОРА В АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯХ НА ОСНОВЕ РЕГРЕССИОННОГО АНАЛИЗА МОДУЛЯ РЕЗУЛЬТИРУЮЩЕГО ВЕКТОРА ТОКА СТАТОРА

Баннов Дмитрий Михайлович,
bannov.dm@samgtu.ru

Самарский государственный технический университет,
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 224.

Актуальность исследования обусловлена большой зависимостью бесперебойной работы ответственных механизмов, приводимых во вращение высоковольтным асинхронным двигателем, работающих в нефтегазовой и химической промышленности, металлургии, электроэнергетике и других стратегически значимых отраслях страны. Особо остро вопрос надежности непрерывной работы стоит при эксплуатации тепловых электрических станций. Практически все электроприводы ответственных механизмов собственных нужд тепловых электрических станций выполняются на базе мощных высоковольтных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором. Как правило, спецификой работы этих двигателей являются тяжелые условия пуска под нагрузкой при повышенных температурах и загрязнении окружающей среды. Аварийные остановы асинхронных двигателей совместно с ответственными механизмами на тепловых электрических станциях в конечном результате вызывают отключение энергоблока, приводят к недоотпуску электроэнергии и пересмотру режима работы электроэнергетической системы. Несмотря на такие последствия, в частности от повреждений короткозамкнутой обмотки ротора высоковольтного асинхронного двигателя, до сих пор не разработана защита, обладающая чувствительностью, способной выявить этот дефект. Повреждение роторной цепи носит скрытый характер, может существовать достаточно длительное время, не оказывая критического влияния на режим работы машины, тем не менее факт наличия обрыва можно считать аварийным состоянием машины в комплексе с механизмом. По данным ремонтов и ревизий высоковольтных асинхронных двигателей имеют место случаи, когда одновременно повреждены до 30 % стержней всего ротора. При нарушении целостности соединения стержня и короткозамыкающего кольца его деформация может произойти только в сторону воздушного зазора, безвозвратно повреждая активную часть статора. Эксплуатация асинхронного двигателя с обрывом стержня сопровождается рядом дополнительных побочных негативных явлений, например, таких как повышенное потребление электрической энергии, общее снижение характеристик и КПД машины, выделение дополнительного тепла, повышенный износ подшипников. В случае диагностирования дефекта короткозамкнутой обмотки на ранней стадии его развития возможен ремонт ротора силами самого предприятия. Раннее диагностирование обрывов стержней ротора высоковольтных двигателей собственных нужд тепловых электрических станций являлось трудноразрешимой и вместе с тем крайне актуальной задачей.

Цель: разработка и экспериментальное апробирование метода диагностики обрыва стержней ротора высоковольтного асинхронного двигателя, основанного на математической обработке сигналов от датчиков токов статора.

Методы: теория электрических машин, методы цифровой обработки сигналов, статистические методы обработки данных, методы аппроксимации экспериментальных данных, метод регрессионного анализа. Представленные исследования проводились на экспериментальной установке, специально созданной для целей диагностики обрыва стержней ротора.

Результаты. Предложен метод диагностики обрывов стержней ротора, основанный на аппроксимации сигналов токов статора. Выявлен критерий повреждаемости роторной цепи, и получена зависимость этого критерия от степени повреждения «беличьей клетки» асинхронного двигателя.

Ключевые слова:

Надежность электропривода, собственные нужды электростанции, асинхронный двигатель, «беличья клетка», обрыв стержня ротора, диагностика, регрессионный анализ.

Введение

Во всем мире на тепловых электрических станциях в приводах практически всех ответственных механизмов собственных нужд используются асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором (АДКР), и от их надежной работы существенно зависит надежная работа станции в целом.

На тепловых электрических станциях высоковольтные АДКР обеспечивают работу ответственных механизмов собственных нужд и, как правило, эксплуатируются в тяжелых условиях пуска и продолжительной нагрузки, носящей резкопеременный характер. В таких режимах работы и тяжелых условиях окружающей среды (повышенная температура, запыленность и прочие) ротор подвержен воздействию электродинамических, центробежных, температурных нагрузок, приводящих к деформированию токоведущих частей (стержни, короткозамыкающие кольца) и износу сварных соединений.

На повреждение роторной цепи АДКР приходится от 11 до 17 % всех аварийных отказов в зависимости от типа машин, из которых около 80 % приходится на обрыв стержней ротора «беличьей клетки» [1]. Выявить обрыв стержней ротора в рабочих режимах без применения специальных средств диагностики не представляется возможным, поскольку данный дефект носит скрытый характер и проявляет себя только в конечной стадии своего развития. Из-за большой периодичности проведения планово-предупредительных работ и капитальных ремонтов

АДКР своевременно обнаружить трещины или иные дефекты роторной цепи, приводящие к обрыву стержней, также затруднительно. Известны случаи, когда при проведении ревизии и планово-предупредительных работ было выявлено, что на рабочем двигателе порядка 30 % всех стержней ротора повреждены [2]. При эксплуатации таких АДКР возрастает потребляемая ими мощность, растет уровень вибрации, ухудшаются механические свойства машины и сокращается межремонтный период, что характерно и для других типов технологических процессов

с использованием асинхронных машин [3]. Конечная стадия развития обрыва стержня заключается в ослаблении паза магнитопровода ротора и вылета в сторону магнитопровода статора. Как видно из рис. 1, для магнитопровода статора и статорной обмотки обрыв стержня ротора несет такие последствия, при которых невозможно обойтись профилактическим ремонтом. Обрыв стержня способен нанести повреждения изоляции, способствующие замыканию токопроводящих частей статора между собой, как это показано на рис. 1, а [4, 5].

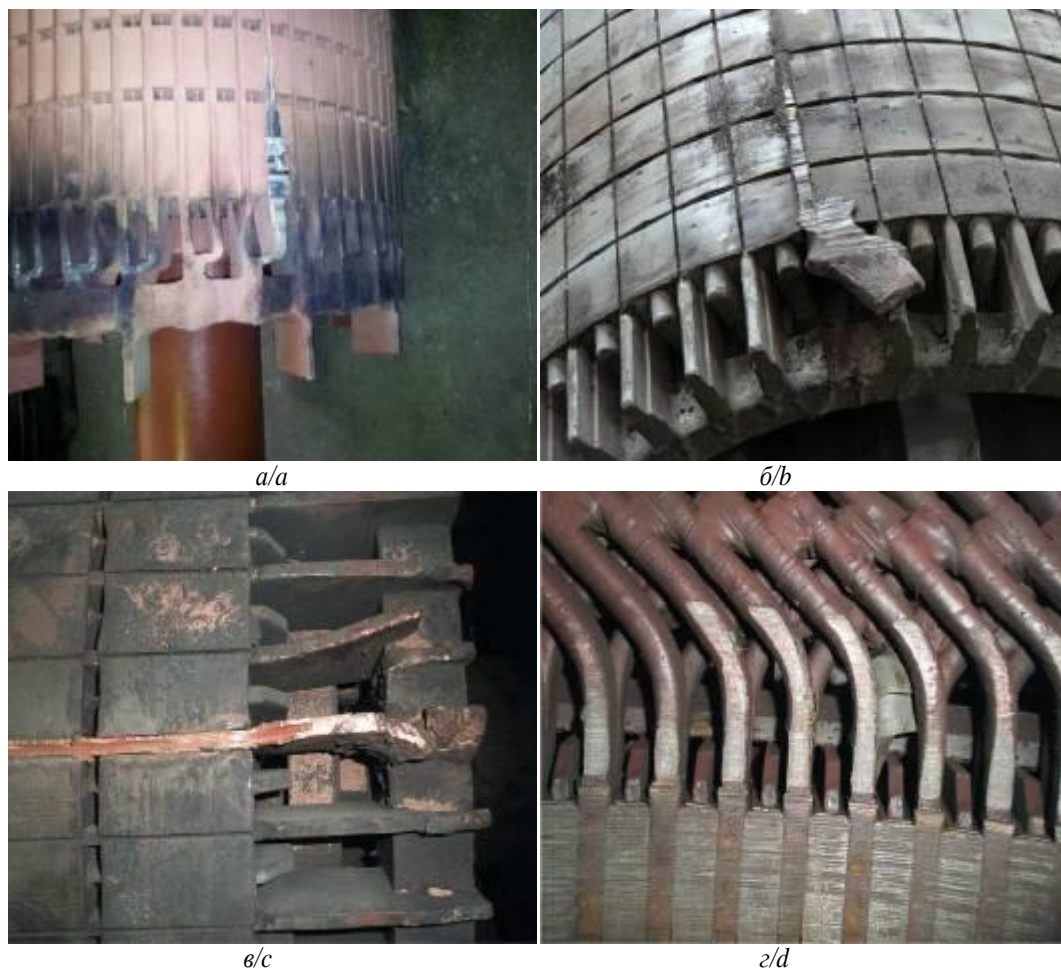


Рис. 1. Последствия обрыва стержня ротора высоковольтного АДКР: а) выход стержня из паза ротора АДКР АДЧР-1600 с последующим коротким замыканием между фазами и на землю статорной обмотки; б) выход стержня из паза ротора АДКР типа ДАЗО; в) выход стержня из паза ротора АДКР типа АНЗ; г) повреждение активной части статора высоковольтного АДКР типа АНЗ

Fig. 1. Effects of damage of the rotor bar of high-voltage induction motor: а) rotor bar exit from the rotor slot of the rotor squirrel cage induction motor (SCIM) type ADChR-1600 followed by a short circuit line to line and line to ground of the stator winding; б) rotor bar exit from the rotor slot of the rotor SCIM type DAZO; в) rotor bar exit from the rotor slot of the rotor SCIM type AMZ; д) damage of stator winding and magnetic core high-voltage SCIM type AMZ

В развитии теории методов диагностирования обрыва стержня АДКР регулярно ведутся исследования не только российских, но и зарубежных ученых. Например, в работах [6–11] авторы используют нейронные сети в сочетании с дискретными преобразованиями Фурье, вейвлет анализа, что усложняет их программную реализацию. В [12] авторы описывают способ определения ложных выявлений обрыва стержня ротора. Из-за низ-

кой чувствительности и селективности указанных методов диагностики они на сегодняшний день широкого применения не нашли. В [13–15] показаны методы, основанные на фиксации и последующем анализе различного рода физических явлений, вызванных обрывом стержня (повышение температуры, аномальная вибрация и прочие), обладают узкой областью применимости, зачастую требуют дополнительных экспериментов.

Например, ГОСТ ISO 20958-2015, посвященный применению сигнатурного анализа контроля состояния и диагностики электрических машин, прямо указывает, что «если механическая нагрузка двигателя изменяется со временем, то ... появление одних и тех же частотных составляющих может быть вызвано разными причинами...» и «для точного определения причин появления данного диагностического признака может потребоваться привлечение дополнительной информации» [16. С. 3].

ГОСТ ИЕС/TS 60034-24-2015, в свою очередь, констатирует, что «Достоверное обнаружение неисправностей беличьей клетки ротора (разрушение стержней и колец) возможно путем анализа токов статора» [17. С. 4]. Там же дается определение идеального диагностического сигнала: «нулевое значение» при штатном состоянии двигателя и «рост при возникновении дефектов всех категорий» [17. С. 5]. В качестве решения здесь предлагается конструктивная доработка двигателя, связанная с размещением дополнительной измерительной обмотки в пазах машины, что очевидно снижает надежность и усложняет конструкцию.

Задачи работы

- создать специализированную установку для изучения особенностей функционирования АДКР при обрыве стержней ротора;
- путём регрессионного анализа токов фаз статора искусственно поврежденного асинхронного двигателя извлечь диагностический признак повреждения стержня ротора АДКР и определить критерий повреждаемости обрыва стержня в «беличьей клетке»;
- разработать методы, алгоритмы и программы, обеспечивающие контроль и диагностику функционирования АДКР в процессе эксплуатации при обрыве стержней ротора в составе рабочих комплексов.

Экспериментальная установка

Для разработки и апробации основных теоретических положений по исследованию работы АДКР в неисправном состоянии с обрывом стержня в обмотке короткозамкнутого ротора необходима экспериментальная установка, отвечающая следующим требованиям:

- установка должна иметь цифровую систему сбора данных с частотой дискретизации, достаточной для качественной обработки информации с помощью современных интеллектуальных методов;
- установка должна быть обеспечена возможностью воздействия механической нагрузки на вал испытуемого АДКР для исследования работы в режиме эксплуатации;
- обрыв стержня ротора испытуемого АДКР должен происходить без повреждения целостности конструкции и магнитопровода, с возможностью восстановления исходного состояния.

При проведении испытаний сигналы токов статора получали методом электронного преобразования в

пропорциональный выходной сигнал при помощи датчиков тока на эффекте Холла LEM HY 05...25 P и напряжения LEM LV 25-P/SP3, с гальванической развязкой между силовой и измерительной цепями. Аналого-цифровым преобразователем (АЦП) была выбрана плата от производителя National Instruments PCI-6024E. Плата имеет 16 однопроводных или 8 дифференциальных аналоговых входов с программируемым диапазоном от $\pm 0,05$ до ± 10 В, 12-битным процессором, 200 кГц, 8 дискретных линий ввода/вывода и два таймер-счетчика по 24 бит. Составление алгоритма получения сигналов и настройка проводились в программном пакете LabVIEW, поскольку в него интегрирован терминал ввода DAQ Assistant, связывающий АЦП с программой виртуального прибора. При помощи него настраиваются все подключения, приходящие по кабелю R6868 от коннектора ввода CB-68LP, и выбираются требуемые параметры ввода данных. Там же настраивается частота дискретизации и продолжительность измерений. Структурная схема электронной части экспериментальной установки представлена на рис. 2.

Для имитации нагрузки на валу испытуемого АДКР в качестве элемента, создающего тормозящий момент, выбран аналогичный по мощности АДКР, который использовался в режиме электродинамического торможения. Опытным путем, основываясь на исходных данных двигателя-тормоза, был разработан выпрямительный элемент, подключаемый к нему в режиме работы (торможения) и позволяющий регулировать нагрузочный момент на валу испытуемого АДКР. На рис. 3 представлена принципиальная схема подключения к обмоткам статора испытуемого АДКР и асинхронного двигателя, работающего в режиме динамического торможения.

С целью приближения к реальным условиям и получения дополнительных возможностей в рамках поставленных задач принято решение спроектировать и изготовить новый магнитопровод, учитывающий габариты, количество стержней и прочие характеристики активной части заводского ротора. Статор данного АДКР оставлен без изменений. Для возможности свободного регулирования количества оборванных стержней в качестве материала «беличьей клетки» была выбрана медь, что обусловлено хорошо отлаженной технологией пайки. Активная часть разработанного специализированного ротора собрана на валу исходного АДКР. На рис. 4 представлен ротор испытуемого АДКР.

Как видно из рис. 4, новая конструкция ротора позволяет путем пайки отделять от короткозамыкающего кольца или присоединять к нему требуемое количество стержней, тем самым обеспечивая повторяемость экспериментов. На рис. 5 показан пример имитации аварийного состояния роторной обмотки АДКР с обрывом одного или двух стержней.

На данной экспериментальной установке получены временные ряды значений токов фаз, потребляемых АДКР при различных сочетаниях оборванных стержней ротора в установившемся режиме. Фрагмент исследования приведен на рис. 6.

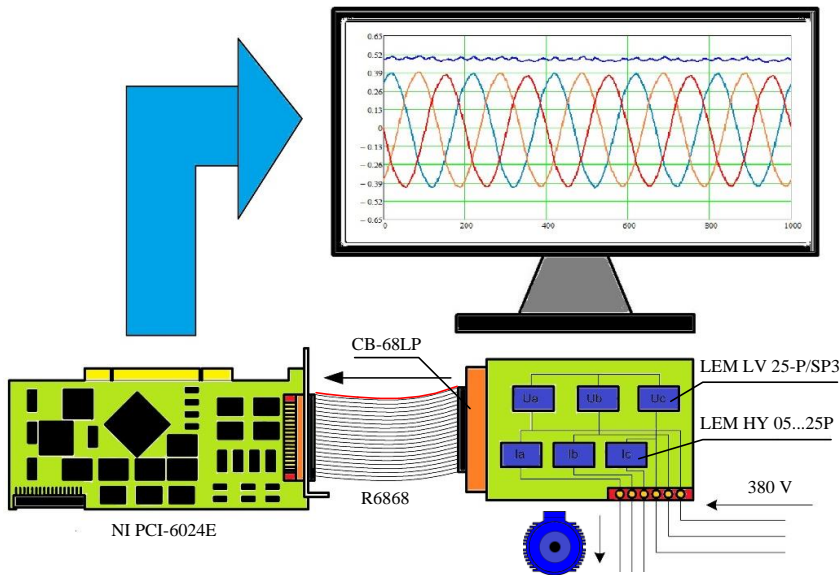


Рис. 2. Структурная схема экспериментальной установки
Fig. 2. Block diagram of the workbench

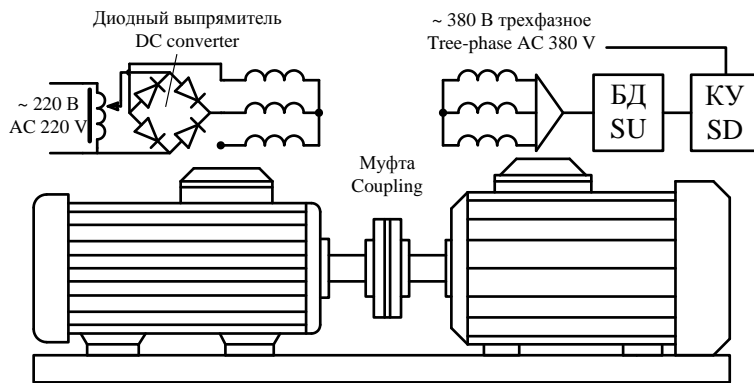


Рис. 3. Принципиальная схема подключения обмоток испытуемого АДКР (БД – блок датчиков, КУ – коммутационное устройство) и двигателя, работающего в режиме динамического торможения, подключенного через диодный выпрямитель
Fig. 3. Electric circuit of the connection of the windings of the tested SCIM (SU – sensor unit, SD – switching device) and the motor operating in the dynamic braking mode, connected through a diode rectifier

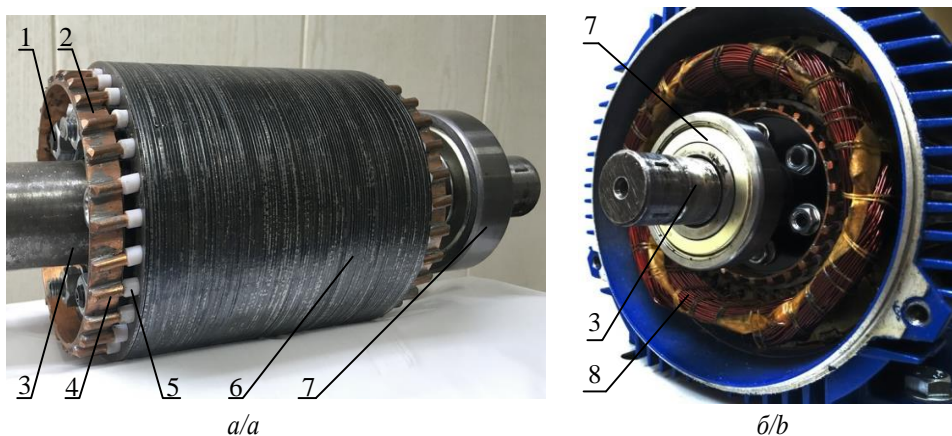


Рис. 4. Испытуемый АДКР: а) ротор испытуемого АДКР; б) испытуемый АДКР в сборе. 1 – диэлектрический крепеж, стягивающий пластины магнитопровода, 2 – короткозамыкающее кольцо, 3 – вал ротора, 4 – стержни «беличьей клетки», 5 – изоляция из фторопласта, 6 – магнитопровод, 7 – подшипники, 8 – статорная обмотка
Fig. 4. Tested SCIM: a) rotor of the tested SCIM; b) tested SCIM assembly. 1 – dielectric fasteners tightening the magnetic circuit plates, 2 – end-ring, 3 – rotor shaft, 4 – «squirrel cage» rotor bar, 5 – temperature resistant insulation, 6 – magnetic core, 7 – bearings, 8 – stator winding

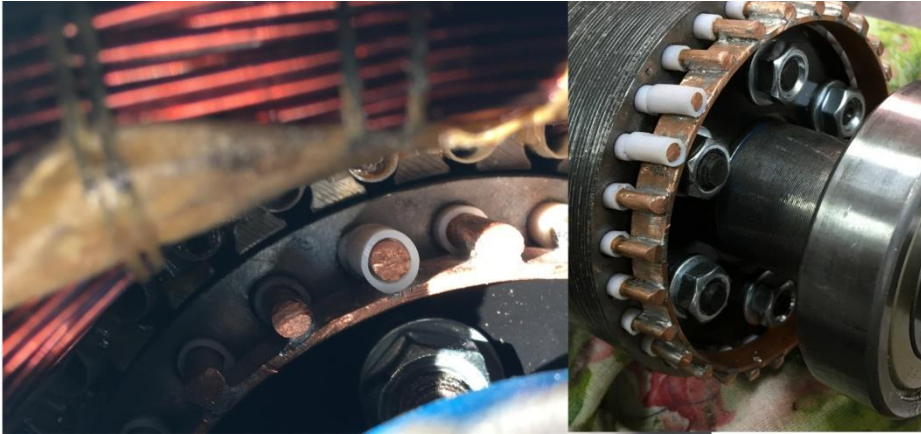


Рис. 5. Обрыв стержней ротора асинхронного двигателя – одного стержня, двух стержней
Fig. 5. Breakage of the rotor bar of an induction motor – one rotor bar, two rotor bars

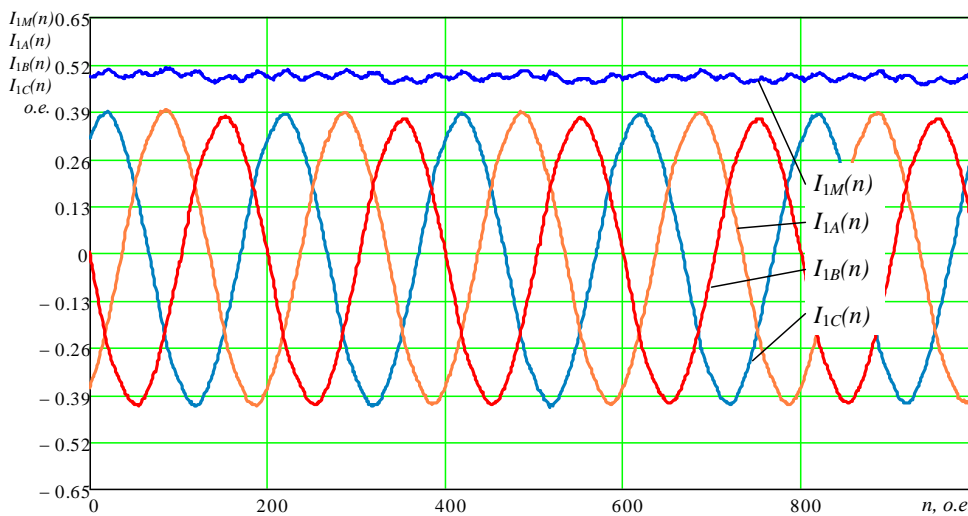


Рис. 6. Временные диаграммы установившихся процессов в статорных обмотках исследуемого АДКР: $I_{1A}(n)$, $I_{1B}(n)$, $I_{1C}(n)$ – мгновенные значения измеренных фазных токов статора в дискретном времени (n), $I_{1M}(n)$ – временная диаграмма обобщающего модуля вектора тока статора в дискретном времени (n), n – номер отсчета
Fig. 6. Diagrams of steady-state processes in the stator windings of the investigated SCIM: $I_{1A}(n)$, $I_{1B}(n)$, $I_{1C}(n)$ – instantaneous values of the measured stator phase currents in discrete time (n), $I_{1M}(n)$ – time diagram of the resultant stator current vector in discrete time (n), n – reference number

Метод обработки полученных сигналов

Ранее применительно к задачам диагностики обрыва стержней ротора в АДКР была теоретически обоснована необходимость анализировать токовые сигналы трех фаз статорной обмотки путем преобразования их в один временной ряд модуля результирующего вектора токов статора [18]:

$$I_{1M}(n) = \sqrt{I_{1A}^2(n) + I_{1B}^2(n) + I_{1C}^2(n)}, \quad (1)$$

где $I_{1M}(n)$ – модуль результирующего вектора токов статора; $I_{1A}(n)$ – ток статора фазы А; $I_{1B}(n)$ – ток статора фазы В; $I_{1C}(n)$ – ток статора фазы С; n – номер отсчета.

Отметим, что АДКР, как и любой электромеханический преобразователь, имеет электрическую и магнитную несимметрию, порождаемую неидеальностью производственных процессов при укладке обмоток в пазы магнитопровода, при производстве роторной цепи и неизбежным эксцентриситетом воздушного

зазора. При математическом моделировании данные обстоятельства не учитываются [18], а питание машины моделируется симметричным источником ЭДС, следовательно, теоретический модуль обобщающего вектора токов статора $I_{1M}(n)$ будет постоянен во времени. При натурном эксперименте из-за отмеченных выше несимметричных воздействий на временную зависимость вектора $I_{1M}(n)$ будут накладываться хаотические колебания малой амплитуды. На рис. 6 показаны мгновенные значения фазных токов статора АДКР и модуля обобщающего вектора токов статора (1). Приведенный фрагмент соответствует установившемуся режиму холостого хода при исправном состоянии ротора (рис. 4). Кривые $I_{1A}(n)$, $I_{1B}(n)$, $I_{1C}(n)$ содержат признаки несимметрии питающего напряжения.

При отмеченных выше обстоятельствах натурного эксперимента, характерных и для реальных режимов эксплуатации, дальнейший анализ полученного экспериментально временного ряда $I_{1M}(n)$ целесообразно

проводить с применением теоретических подходов регрессионного анализа.

Наиболее прост, с точки зрения вычислений, и пригоден для математического описания метод линейной регрессии общего вида, представляющий собой линейную комбинацию функций от параметров. Описываемая функция имеет вид:

$$Y(X) = \beta_0 + \beta_1 \cdot X_1 + \dots + \beta_n \cdot X_n,$$

где $\beta_{1...n}$ – базисные функции, задающие ее размерность; $X_{1...n}$ – весовые коэффициенты, определяющие значимость этой функции. Весовые коэффициенты находятся по критерию минимума квадрата расстояний от исходного сигнала к его математической модели по методу наименьших квадратов.

Полученный от датчиков токов статора сигнал имеет дискретный вид и является периодическим, поэтому выбранная модель должна быть линейно независимой и характеризоваться отсутствием мультиколлинеарности, приводящей к неустойчивости оценок. Также необходимо описать экспериментальные данные, не привязывая функцию к узловым точкам, а оптимально приближая ее к ним, используя свойство компенсации ошибки квантования в определенных пределах, обусловленных разрядностью АЦП. Отметим, что, поскольку период дискретизации АЦП в данной работе составляет 10 кГц, при $n=200$ продолжительность сигнала будет 0,02 секунды, что является одним периодом частоты сети 50 Гц.

Одним из главных вопросов при выполнении данного исследования является выбор функционального базиса, определяющего вид регрессии. В математическом аппарате регрессионного анализа имеются различные виды уравнений регрессии: полиномиальная, гребневая (ридж-регрессия), гиперболическая, экспо-

ненциальная, степенная, Байесовская, квантильная и многие другие [19]. Для корректного выбора базисных функций используемой модели аналитического описания исходного сигнала необходимо, чтобы описываемая функция и сам сигнал максимально совпадали по форме. Поскольку получаемые сигналы имеют периодический и гармонический характер, для решения поставленных задач наиболее подходящим представляется базис, состоящий из косинусо-синусных функций (Фурье-базис). Получаемая модель имеет вид:

$$\varphi(x) = A_0 + A_1 \cos(2\pi \cdot f_0 \cdot k_0 \cdot x) + B_1 \sin(2\pi \cdot f_0 \cdot k_0 \cdot x) + \dots + A_n \cos(2\pi \cdot f_0 \cdot k_n \cdot x) + B_n \sin(2\pi \cdot f_0 \cdot k_n \cdot x),$$

где A, B – весовые коэффициенты при базисных функциях; f_0 – базовая частота; k – параметр, регулирующий величину базиса.

Фурье-базис обладает свойствами ортогональности и ортонормированности, что позволяет получить функцию аналитического описания заданной точности наиболее коротким отрезком экспериментальных данных, а также способствует успешному решению обратных некорректно поставленных задач [20].

Таким свойством аппроксимации экспериментальных данных обладает регрессионный анализ. Известно, что, в отличие от интерполяции, регрессия описывает исходные сигналы функцией, не накладывая ее на точки измерения. Полученная по 200 измерениям (1 период 50 Гц) модель и сами точки представлены на рис. 7.

Среди всего многообразия способов получения весовых коэффициентов был выбран оптимальный с точки зрения аппаратной реализации и точности метод наименьших квадратов.

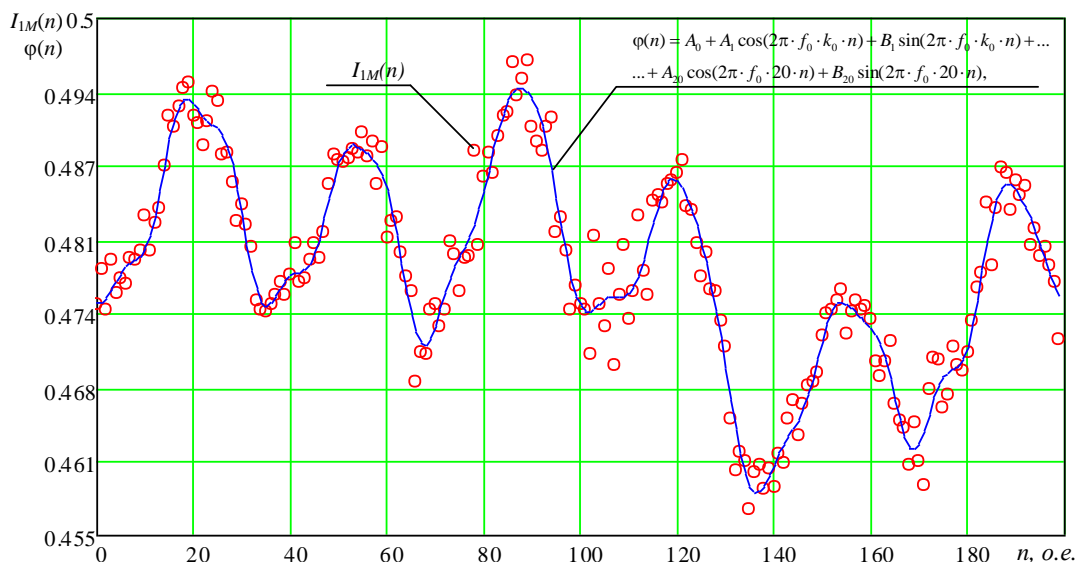


Рис. 7. $I_{1M}(n)$ – временная диаграмма модуля результирующего вектора тока статора, полученная по сигналам токов статора при исправном состоянии; $\varphi(n)$ – временная диаграмма выходного сигнала настраиваемой регрессионной модели, построенная с размерностью базиса $k=20$

Fig. 7. $I_{1M}(n)$ – time diagram of the module of the resulting stator current vector, obtained from experimental data on stator current signals when the stator currents are in healthy condition; $\varphi(n)$ – time diagram of the output signal of a custom regression model constructed with a basis dimension $k=20$

Такой способ описания экспериментальных данных позволяет регулировать точность описываемой функции путем прибавления и убавления составляющих базисного функционала. При этом ряд Фурье сходится к исходному экспериментальному сигналу по известной теории тригонометрических рядов при количестве гармоник, стремящихся к бесконечности. Это положительное свойство позволяет адаптировать математическую часть разраба-

тываемого метода к аппаратной части микропроцессорного контроллера, находя оптимальный баланс между точностью и вычислительными возможностями [21].

Оценить адекватность составленной модели можно визуально по регрессионным остаткам ε , представленным на рис. 8:

$$\varepsilon(n) = I_{IM}(n) - \varphi(n).$$

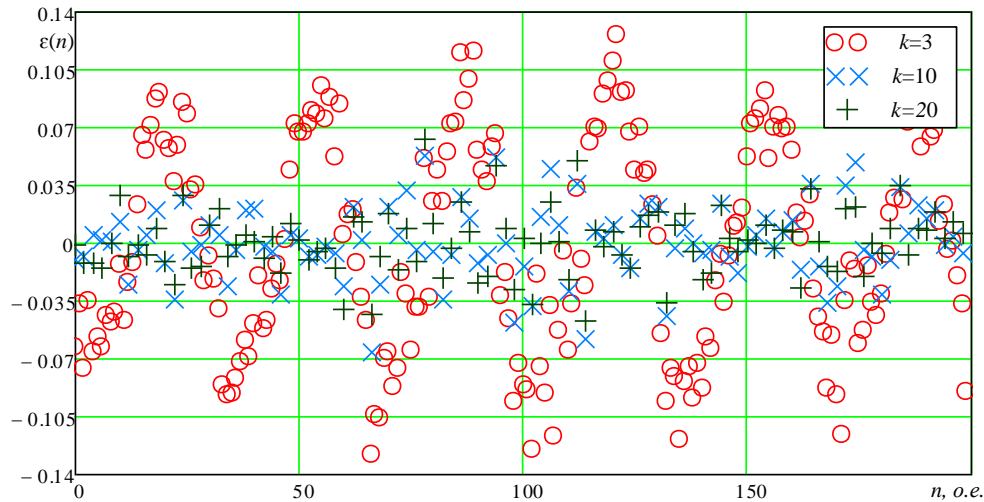


Рис. 8. Временные диаграммы регрессионных остатков $\varepsilon(n)$ настраиваемой модели при различной размерности гармонического базиса (3, 10 и 20)

Fig. 8. Timing diagrams of the regression residuals $\varepsilon(n)$ of the tuned model for different dimensions of the harmonic basis (3, 10 and 20)

Поскольку исследуемые сигналы порождаются одним и тем же объектом и являются достаточно однородными, становится оправданным применение в качестве критерия оценки адекватности модели одного из основных условий методов регрессионного анализа о том, что регрессионные остатки не коррелированы между собой и имеют постоянную дисперсию [22]. Такое обстоятельство позволяет использовать для решения поставленных задач наиболее простой и практичный метод визуального анализа, сводящийся к оценке

математического ожидания и дисперсии остатков. Дисперсия для выборки данных находится по:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N s_i^2}{N}},$$

где S – разница между экспериментальным значением и описывающей функцией; N – количество точек выборки.

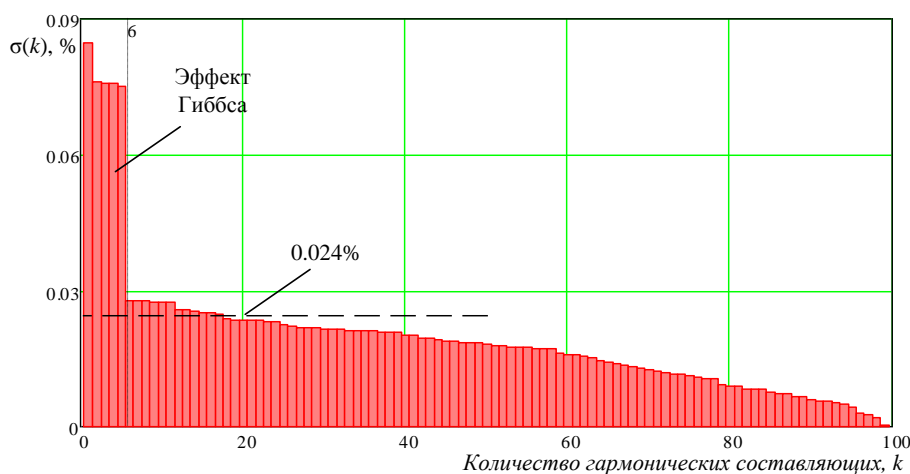


Рис. 9. Зависимость оценки дисперсии регрессионных остатков σ модели от размерности гармонического базиса настраиваемой модели, k

Fig. 9. Dependence of the estimate of the variance of the regression residuals σ of the model on the dimension of the harmonic basis of the adjusted model, k

На рис. 9 показана зависимость дисперсии σ от количества гармонических составляющих используемого ортогонального базиса k , полученная путем обработки одних и тех же экспериментальных данных с разной точностью описывающей функции от 3 до 99 составляющих базиса.

Как видно из рис. 9, выбирать размерность базиса k ниже шести составляющих нецелесообразно, поскольку описываемый сигнал и получаемая модель имеют значительную гетероскедантность и высокий разброс. Это обусловлено искажениями сигнала, полученными в результате влияния эффекта Гиббса. Увеличение размерности базиса до 45 k не приводит к значительному повышению качества описывающей функции и исчерпывает вычислительные ресурсы. При 18 и более гармонических составляющих преодолевается значение относительной погрешности 0,024 % для АЦП с разрешающей способностью 12 бит.

Получение диагностического признака

Как говорилось ранее, выбранный базисный функционал является ортогональным и обладает свойствами, которые дают возможность представлять весовые коэффициенты ($A_{1...k}$ и $B_{1...k}$) как координаты изображающего вектора в k -мерном ортогональном

гиперпространстве. В связи с этим положением полученные результаты можно представлять как векторы и проводить над ними действия по законам векторной алгебры и аналитической геометрии [23]. Сначала определяется изображающий вектор неповрежденного АДКР \mathbf{V} и изображающие векторы АДКР с повреждением 1, 2, 3 и 4 стержней, затем находится их модуль. Найдя вектор-разницу \mathbf{L} между изображающими векторами неповрежденного АДКР и с повреждением $\mathbf{L1}=\mathbf{V}-\mathbf{U}$; $\mathbf{L2}=\mathbf{V}-\mathbf{U2}$; $\mathbf{L3}=\mathbf{V}-\mathbf{U3}$; $\mathbf{L4}=\mathbf{V}-\mathbf{U4}$, необходимо найти их длину, и она будет тем больше, чем больше повреждение ротора АДКР. В качестве примера демонстрации предлагаемых решений метода диагностирования на рис. 10 представлен трехмерный фрагмент k -мерного гиперпространства, на котором построен изображающий вектор исправного состояния АДКР $\mathbf{V}[vA_1, vB_1, vA_2]$, а также изображающий вектор исправного состояния АДКР $\mathbf{V1}[v1A_1, v1B_1, v1A_2]$, полученный по результатам анализа другой выборки этого же сигнала, в том же режиме работы. Изображающий вектор $\mathbf{U}[uA_1, uB_1, uA_2]$ характеризует неисправное состояние роторной цепи АДКР, изображающие вектора \mathbf{L} и $\mathbf{L1}$ – геометрическая разница изображающих векторов неповрежденного состояния (\mathbf{V}) и исследуемого состояния ($\mathbf{V1}, \mathbf{U}$).

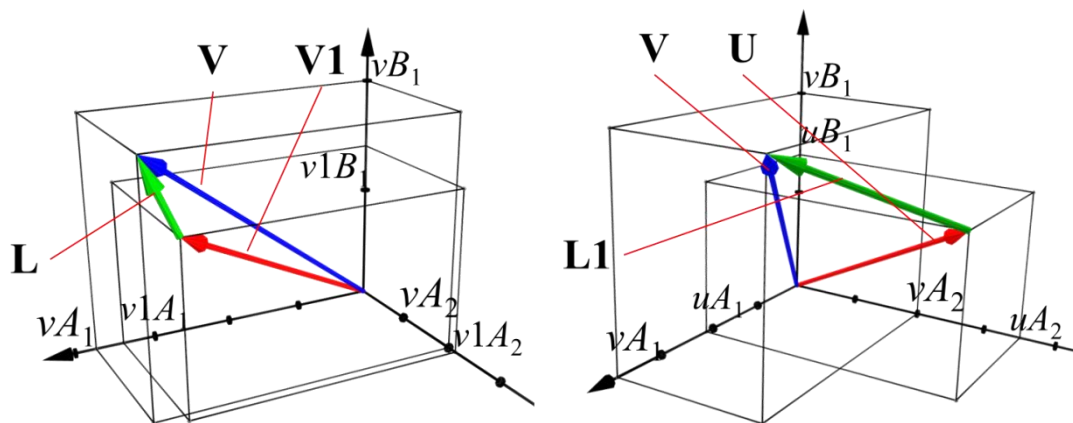


Рис. 10. Семейство изображающих векторов, геометрически интерпретирующее выделение диагностического признака: \mathbf{V} – изображающий вектор для неповрежденного АДКР; $\mathbf{V1}$ – изображающий вектор для неповрежденного АДКР, полученный при исследовании другого временного участка; \mathbf{U} – изображающий вектор для поврежденного АДКР; \mathbf{L} и $\mathbf{L1}$ – вектор-разница для выделения диагностического признака

Fig. 10. Family of depicting vectors explaining the process of identifying a diagnostic feature: \mathbf{V} – depicting vector for undamaged SCIM; $\mathbf{V1}$ – imaging vector for an intact SCIM obtained by examining another time section; \mathbf{U} – depicting vector for damaged SCIM; \mathbf{L} and $\mathbf{L1}$ – vector-substraction for highlighting a diagnostic sign

Выходной сигнал диагностической системы γ определяется как отношение модуля вектора-разницы к длине изображающего вектора неповрежденного состояния АДКР.

$$\gamma = \frac{|\mathbf{L}|}{|\mathbf{V}|} \cdot 100\%, \quad (2)$$

где $|\mathbf{L}|$ – модуль вектора-разницы между изображающими векторами неповрежденного и поврежденного состояния АДКР; $|\mathbf{V}|$ – модуль изображающего вектора исследуемого состояния АДКР.

Результаты, полученные по (2) после построения всех векторов \mathbf{L} для каждого состояния (целый ротор, оборван 1, 2, 3, 4 стержня) АДКР, представлены на рис. 11 в виде гистограммы. При этом значение векторов \mathbf{L} для неповрежденного ротора определялось по двум разным временным участкам холостого хода АДКР.

Как видно из рис. 11, диагностический признак имеет зависимость от степени повреждения короткозамкнутой роторной цепи АДКР и с возрастанием количества оборванных стержней «беличьей клетки» возрастает его величина.

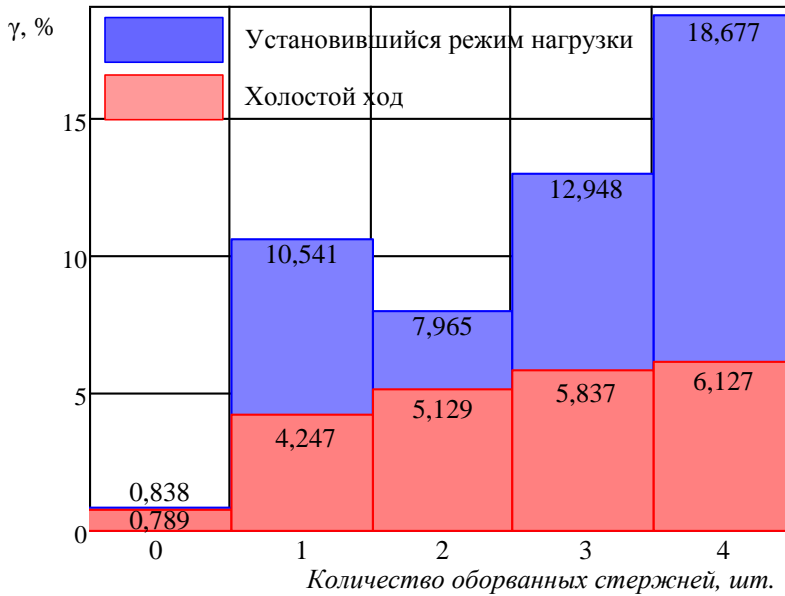


Рис. 11. Гистограмма зависимости выходного диагностического сигнала γ от количества оборванных стержней при работе АДКР на холостом ходу и при установившемся режиме под нагрузкой

Fig. 11. Histogram of the output diagnostic signal γ dependence on the number of broken rotor bars when the SCIM is idling and in steady state under load

Полученный в натурном эксперименте результат подтверждает теоретическое обоснование влияния обрыва стержня ротора на модуль результирующего вектора токов статора [18]. В дальнейшем предложенный подход может быть распространен на решение задач идентификации, моделирования и диагностики АДКР в других отраслях промышленности, например в нефтедобыче [24], а также при решении задач управления качеством электрической энергии в изолированных системах электроснабжения [25].

Здесь обрывы стержней ротора АДКР могут приводить к серьезным нарушениям технологического режима.

Разработанный метод диагностики обрыва стержней ротора применим на практике как в составе отдельного диагностического устройства, так и в качестве дополнения к штатным средствам автоматики, защиты и управления асинхронными двигателями, основанным на микропроцессорной элементной базе.

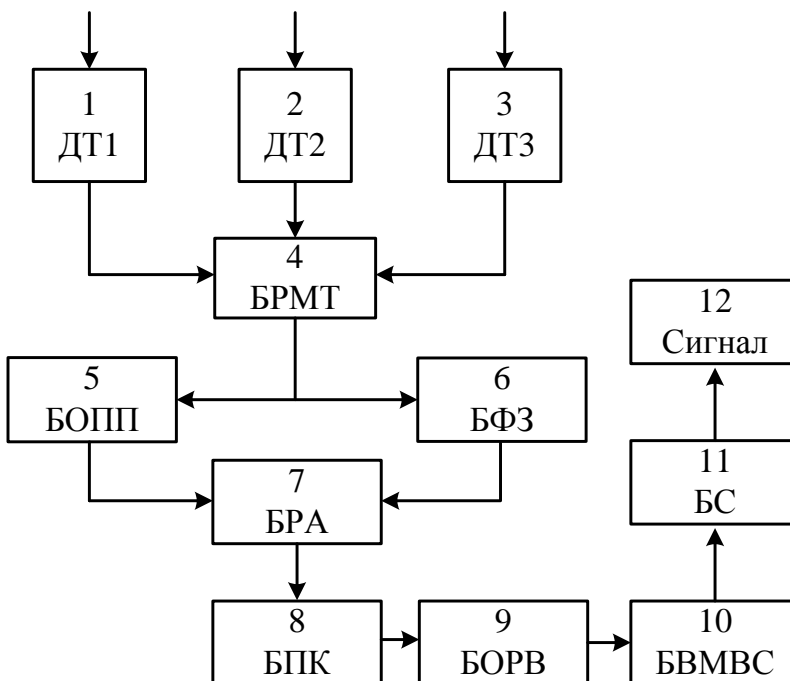


Рис. 12. Блок-схема устройства для диагностики состояния асинхронного двигателя

Fig. 12. Block diagram of a device for diagnosing induction motor conditions

Устройство для диагностики обрыва стержней ротора

На основе разработанного метода предложено устройство диагностики обрыва стержней ротора АДКР, которое можно реализовать аппаратно при помощи стандартной элементной базы, используя встроенные в большинство программных языков операторы. Согласно описанному ранее алгоритму оцифрованные сигналы токов статора подвергаются анализу на основе линейной регрессии общего вида.

Способ определения обрыва стержня ротора асинхронного электродвигателя осуществлен с помощью устройства (рис. 12), содержащего датчики токов – 1 (ДТ1), 2 (ДТ2), 3 (ДТ3), которые подключены к фазам питания асинхронного электродвигателя. Выходы датчиков токов подключены к блоку вычисления результирующего модуля тока – 4 (БРМТ), к которому подключены блок отстройки от переходного процесса – 5 (БОПП) и блок формирования задержки – 6 (БФЗ), которые соединены с блоком регрессионного анализа – 7 (БРА). К блоку регрессионного анализа – 7 (БРА) последовательно подключены блок памяти коэффициентов – 8 (БПК), блок определения геометрической разницы векторов – 9 (БОРВ), блок выделения модуля вектора состояния – 10 (БВМВС), блок сравнения диагностических сигналов – 11 (БС) и устройство сигнализации – 12 (Сигнал) [26].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сафин Н.Р. Совершенствование методики токовой диагностики асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором: дис. ... канд. техн. наук. – Екатеринбург, 2017. – 152 с.
2. Собственные нужды тепловых электростанций / под ред. Ю.М. Голоднова. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 272 с.
3. Лавренов Е.О. Методы компенсации влияния электрической несимметрии на механический момент индукционного двигателя // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2016. – Т. 327. – № 1. – С. 72–78.
4. Зюзев А.М., Метельков В.П. Аналитический метод оценки нагрева обмотки ротора высоковольтных асинхронных двигателей в пусковых режимах // Электротехнические системы и комплексы. – 2017. – № 1 (34). – С. 60–67. DOI: [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-1\(34\)-60-67](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-1(34)-60-67)
5. Новоселов Е.Н. Разработка метода функциональной диагностики обмотки ротора асинхронных электродвигателей собственных нужд электростанций по внешнему магнитному полю: дис. ... канд. техн. наук. – Иваново, 2018. – 234 с.
6. Hamza Sabir, Mohammed Ouassaid, Nabil Ngote. An experimental method for diagnostic of incipient broken rotor bar fault in induction machines // Heliyon. – 2022. – V. 8. – Issue 3. – P. 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09136>. (дата обращения 15.02.2022).
7. Prashant Kumar, Ananda Shankar Hati. Deep convolutional neural network based on adaptive gradient optimizer for fault detection in SCIM // ISA Transactions. – 2021. – V. 111. – P. 350–359. <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2020.10.052>. (дата обращения 15.02.2022).
8. Rajvardhan Jigyasu, Vivek Shrivastava, Sachin Singh. Smart classifier based prognostics and health management of induction motor // Materials Today: Proceedings. – 2021. – V. 43. – Part 1. – P. 355–361. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.11.677>. (дата обращения 15.02.2022).
9. Yunkai Wu, Bin Jiang, Yulong Wang. Incipient winding fault detection and diagnosis for squirrel-cage induction motors equipped on CRH trains // ISA Transactions. – 2020. – V. 99. – P. 488–495. <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2019.09.020>. (дата обращения 15.02.2022).
10. Efficient feature extraction technique for diagnosing broken bars in three-phase induction machines / L.H.V. Liboni, R.A. Flauzino,

Выводы

1. На основе известного принципа физического подобию для отладки диагностической системы разработана и создана экспериментальная установка, позволяющая проводить настройку диагностической системы, повышающую чувствительность, вплоть до распознавания обрыва одного стержня.
2. Предложен метод диагностики обрыва стержней ротора АДКР и устройство, основанное на выделении с помощью регрессионного анализа в гармоническом базисе диагностического признака из модуля результирующего вектора токов статора асинхронного двигателя в установившемся режиме работы.
3. Принцип формирования диагностического признака основан на выделении модуля разницы двух изображающих векторов, образованных в многомерном пространстве по координатам, которые являются весовыми коэффициентами при базисных функциях в неповрежденном и поврежденном состоянии ротора.
4. Определены максимальные и минимальные размерности регрессионной модели, согласованные с 12-ти разрядным АЦП в измерительном канале диагностической системы.

- I.N. da Silva, E.C.M. Costa // Measurement. – 2019. – V. 134. – P. 825–834. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.12.005>. (дата обращения 15.02.2022).
11. Detection and quantification of bar breakage harmonics evolutions in inverter-fed motors through the dragon transform / V. Fernandez-Cavero, J. Pons-Llinares, O. Duque-Perez, D. Morinigo-Sotelo // ISA Transactions. – 2021. – V. 109. – P. 352–367. <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2020.10.020>. (дата обращения 15.02.2022).
12. Elimination of broken rotor bars false indications in induction machines / O. Guellout, A. Rezig, S. Touati, A. Djerdir // Mathematics and Computers in Simulation. – 2020. V. 167. – P. 250–266. <https://doi.org/10.1016/j.matcom.2019.06.010>.
13. Prashant Kumar, Ananda Shankar Hati. Dilated convolutional neural network based model for bearing faults and broken rotor bar detection in squirrel cage induction motors // Expert Systems with Applications. – 2022. – V. 191. – P. 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.116290>. (дата обращения 15.02.2022).
14. Priyanka Gandhi, Dr Neelam Turk, Dr Ratna Dahiya. Health monitoring of induction motors through embedded systems-simulation of broken rotor bar fault and abnormal gear teeth fault // Microprocessors and Microsystems. – 2020. – V. 76. – P. 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.micpro.2020.103077>. (дата обращения 15.02.2022).
15. Ying Xie, Peng Chen, Fei Li, Haisong Liu. Electromagnetic forces signature and vibration characteristic for diagnosis broken bars in squirrel cage induction motors // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2019. – V. 123. – P. 554–572. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2019.01.030>. (дата обращения 15.02.2022).
16. ГОСТ ISO 20958-2015. Контроль состояния и диагностика машин. Сигнатурный анализ электрических сигналов трехфазного асинхронного двигателя. – М.: Стандартиформ, 2016. – 28 с.
17. ГОСТ IEC/TS 60034-24-2015. Машины электрические вращающиеся. Ч. 24. Онлайнное обнаружение и диагностика потенциальных отказов активных деталей вращающихся электромашин и деталей с подшипниковым током. Руководство по применению. – М.: Стандартиформ, 2017. – 16 с.

18. Математическая модель асинхронного двигателя в мультифазной системе координат при несимметрии роторных цепей / А.С. Глазырин, В.И. Полищук, В.В. Тимошкин, Д.М. Баннов, Ю.Н. Исаев, Д.И. Антяскин, С.Н. Кладиев, А.А. Филипас, С.В. Ланграф, Д.А. Котин, В.З. Ковалев // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 10. – С. 213–227. URL: <https://doi.org/10.18799/24131830/2021/10/3404> (дата обращения 15.02.2022).
19. Кобзарь А.И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2012. – 813 с.
20. Классические ортогональные базисы в задачах аналитического описания и обработки информационных сигналов / Ф.Ф. Дедус, Л.И. Куликова, А.Н. Панкратов, Р.К. Тетуев. – М.: МГУ им. М.В. Ломоносова, 2004. – 141 с.
21. Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники / Пер. с англ. изд. 2-е. – М.: Изд-во «БИНОМ», 2015. – 704 с.
22. Вадутов О.С. Математические основы обработки сигналов. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 212 с.
23. Бортаковский А.С., Пантелеев А.В. Аналитическая геометрия в примерах и задачах. – М.: Высш. шк., 2005. – 496 с.
24. Определение параметров схемы замещения погружного электродвигателя на основании данных испытаний / С.С. Шубин, В.У. Ямалиев, А.С. Глазырин, Д.С. Буньков, С.Н. Кладиев, И.В. Раков, Е.В. Боловин, В.З. Ковалев, Р.Н. Хамитов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 1. – С. 204–214. URL: <https://doi.org/10.18799/24131830/2021/1/3013> (дата обращения 15.02.2022).
25. Identification of mathematical models parameters of electromechanical consumers of regionally isolated electrotechnical complexes / V.Z. Kovalev, O.V. Arhipova, S.S. Esin, A.A. Tatevosyan, A.G. Scherbakov // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – V. 1260. – Iss. 5. – P. 1–7. URL: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1260/5/052014> (дата обращения 15.02.2022).
26. Устройство для диагностики состояния асинхронного электродвигателя: пат. 2763849 Рос. Федерация. № 2021114881; заявл. 26.05.2021; опубл. 11.01.2022, Бюл. № 2.

Поступила 16.05.2022 г.

Информация об авторах

Баннов Д.М., инженер кафедры электрических станций Электротехнического факультета Самарского государственного технического университета.

UDC 621.313.04

METHOD OF DIAGNOSING BROKEN ROTOR BARS OF INDUCTION MOTORS BASED ON REGRESSION ANALYSIS OF THE STATOR CURRENT RESULTANT VECTOR MODULE

Dmitriy M. Bannov,
bannov.dm@samgtu.ru

Samara State Technical University,
244, Molodogvardeyskaya street, Samara, 443100, Russia.

The relevance of the research is conditioned by great dependence of uninterrupted operation of critical mechanisms driven by high-voltage induction motor, providing operation of oil and gas and chemical industry, metallurgy, electric power industry and other strategically important branches of the country. The issue of reliability of continuous operation is particularly acute in the operation of thermal power plants. Almost all electric drives of critical auxiliary mechanisms of thermal power plants are based on powerful high-voltage induction motors with squirrel-cage rotor. As a rule, specifics of operation of these motors are severe conditions of starting under load at increased temperatures and environmental pollution. Emergency stops of induction motors together with the responsible mechanisms at thermal power plants eventually cause power unit shutdown or lead to under-release of electricity and revision of the operating mode of the power system. Despite such consequences, in particular from damage to the short-circuited rotor winding of a high-voltage induction motor, a protection with sensitivity capable of detecting this defect has not yet been developed or introduced. Damage of rotor circuit has latent character, can exist for a long enough time, not critically affecting the operation of the machine, nevertheless, the fact of presence of breakage can be considered as an emergency condition of the machine in complex with the mechanism. According to the data of repairs and revisions of high-voltage induction motors, there are cases when up to 30 % of bars of the whole rotor were damaged simultaneously. When the integrity of the connection between the bar and the short-circuiting ring is broken, its deformation can occur only in the direction of the air gap, irreversibly damaging the active part of the stator. Operation of inductions motor with a broken core is accompanied by a number of additional negative side effects, such as increased power consumption, general reduction of machine performance and efficiency, generation of additional heat, increased wear of bearings. In case of diagnosing a short-circuited winding defect at an early stage of its development, it is possible to repair the rotor by the company itself. Early diagnosis of rotor core breaks of high-voltage auxiliary motors of thermal power plants is a difficult and at the same time extremely relevant purpose.

The main aim of the research is the development and experimental testing of a method for diagnosing broken rotor bar in a high-voltage induction motor based on mathematical processing of signals from stator current sensors.

Methods: theory of electrical machines, methods of digital signal processing, statistical methods of data processing, methods of approximation of experimental data, method of regression analysis. Presented studies were carried out on the experimental workbench, specially created for the purpose of diagnostics of broken rotor bars.

Results. The paper introduces the method of diagnostics of broken rotor bars based on approximation of stator current signals. The criterion of rotor circuit damageability was revealed and the dependence of this criterion on the degree of damage to the «squirrel cage» of an induction motor was obtained.

Key words:

Reliability of electric drive, auxiliary needs of a power plant, induction motor, «squirrel cage», broken rotor bar, diagnostics, regression analysis.

REFERENCES

- Safin N.R. *Sovershenstvovanie metodiki tokovoy diagnostiki asinkhronnykh dvigateley s korotkozamknutym rotorom*. Dis. Kand. nauk [Improvement of current diagnostics methods for induction motors with squirrel-cage rotor. Cand. Diss.]. Ekaterinburg, 2017. 152 p.
- Sobstvennye nuzhdy teplovykh elektrostantsy* [Auxiliary supplies of thermal power plants]. Ed. by Yu.M. Golodnov. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1991. 272 p.
- Lavrenov E.O. Compensation methods of electrical asymmetry effect on induction motor moment. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2016, vol. 327, no. 1, pp. 72–78. In Rus.
- Ziuzev A.M., Metelkov V.P. Analytical method for evaluation of high-voltage induction motor rotor winding heating at start-up mode. *Electrotechnical systems and complexes*, 2017, no. 1 (34), pp. 60–67. In Rus. DOI: [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-1\(34\)-60-67](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-1(34)-60-67).
- Novoselov E.N. *Razrabotka metoda funktsionalnoy diagnostiki obmotki rotora asinkhronnykh elektrodvigateley sobstvennykh nuzhd elektrostantsy po vneshnemu magnitnomu polyu*. Dis. Kand. nauk [Development of the method of functional diagnostics of rotor winding of induction electric auxiliary motors of power plants by external magnetic field. Cand. Diss.]. Ivanovo, 2018. 234 p.
- Hamza Sabir, Mohammed Ouassaid, Nabil Ngote. An experimental method for diagnostic of incipient broken rotor bar fault in induction machines. *Heliyon*, 2022, vol. 8, no. 3, pp. 1–13. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09136> (accessed 15 February 2022).
- Prashant Kumar, Ananda Shankar Hati. Deep convolutional neural network based on adaptive gradient optimizer for fault detection in SCIM. *ISA Transactions*, 2021, vol. 111, pp. 350–359. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2020.10.052> (accessed 15 February 2022).
- Rajvardhan Jigyasu, Vivek Shrivastava, Sachin Singh. Smart classifier based prognostics and health management of induction motor. *Materials Today: Proceedings*, 2021, vol. 43, P. 1, pp. 355–361. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.11.677> (accessed 15 February 2022).
- Yunkai Wu, Bin Jiang, Yulong Wang. Incipient winding fault detection and diagnosis for squirrel-cage induction motors equipped on CRH trains. *ISA Transactions*, 2020, vol. 99, pp. 488–495. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2019.09.020> (accessed 15 February 2022).
- Liboni L.H.B., Flauzino R.A., Nunes da Silva I., Marques Costa E.C. Efficient feature extraction technique for diagnosing broken bars in three-phase induction machines. *Measurement*, 2019, vol. 134, pp. 825–834. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.12.005> (accessed 15 February 2022).
- Fernandez-Cavero V., Pons-Llinares J., Duque-Perez O., Morinigo-Sotelo D. Detection and quantification of bar breakage harmonics evolutions in inverter-fed motors through the dragon transform. *ISA Transactions*, 2021, vol. 109, pp. 352–367. Available at:

- <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2020.10.020> (accessed 15 February 2022).
12. Guellout O., Rezig A., Touati S., Djerdir A. Elimination of broken rotor bars false indications in induction machines. *Mathematics and Computers in Simulation*, 2020, vol. 167, pp. 250–266. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.matcom.2019.06.010> (accessed 15 February 2022).
 13. Prashant Kumar, Ananda Shankar Hati. Dilated convolutional neural network based model for bearing faults and broken rotor bar detection in squirrel cage induction motors. *Expert Systems with Applications*, 2022, vol. 191, pp. 1–12. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.116290> (accessed 15 February 2022).
 14. Priyanka Gandhi, Dr Neelam Turk, Dr Ratna Dahiya. Health monitoring of induction motors through embedded systems-simulation of broken rotor bar fault and abnormal gear teeth fault. *Microprocessors and Microsystems*, 2020, vol. 76, pp. 1–12. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.micpro.2020.103077> (accessed 15 February 2022).
 15. Ying Xie, Peng Chen, Fei Li, Haisong Liu. Electromagnetic forces signature and vibration characteristic for diagnosis broken bars in squirrel cage induction motors. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2019, vol. 123, pp. 554–572. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2019.01.030> (accessed 15 February 2022).
 16. GOST ISO 20958-2015. *Kontrol sostoyaniya i diagnostika mashin. Signaturny analiz elektricheskikh signalov trekhfaznogo asinkhronnogo dvigatelya* [Condition monitoring and diagnostics of machines. Signature analysis of electrical signals of a three-phase induction motor]. Moscow, StandardInform Publ., 2016. 28 p.
 17. GOST IEC/TS 60034-24-2015. *Mashiny elektricheskije vrashchayushchiesya. Ch. 24. Onlaynovoe obnaruzhenie i diagnostika potentsialnykh otkazov aktivnykh detaley vrashchayushchikhsya elektromashin i detaley s podshipnikovym tokom. Rukovodstvo po primeneniyu* [Rotating electrical machines. P. 24. Online detection and diagnosis of potential failures of active parts of rotating electrical machines and parts with bearing current. Application guide]. Moscow, StandardInform Publ., 2017. 16 p.
 18. Glazyrin A.S., Polishchuk V.I., Timoshkin V.V., Bannov D.M., Isaev Yu.N., Antyaskin D.I., Kladiyev S.N., Filipas A.A., Langraf S.V., Kotin D.A., Kovalev V.Z. Modelling of induction motor in multi-phase coordinate system for asymmetry rotor cage. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 10, pp. 213–227. In Rus. Available at: <https://doi.org/10.18799/24131830/2021/10/3404> (accessed 15 February 2022).
 19. Kobzar A.I. *Prikladnaya matematicheskaya statistika. Dlya inzhenerov i nauchnykh rabotnikov* [Applied mathematical statistics. For engineers and scientists]. Moscow, FIZMATLIT Publ., 2012. 813 p.
 20. Dedus F.F., Kulikova L.I., Pankratov A.N., Tetuev R.K. *Klassicheskie ortogonalnye bazisy v zadachakh analiticheskogo opisaniya i obrabotki informatsionnykh signalov* [Classical orthogonal basics in the problems of analytical description and processing of information signals]. Moscow, M.V. Lomonosov MGU Publ., 2004. 141 p.
 21. Horovic P., Hill U. *Iskusstvo skhemitotekhniki* [Art of circuitry]. 2nd ed. Translated from English. Moscow, BINOM Publ., 2015. 704 p.
 22. Vadutov O.S. *Matematicheskie osnovy obrabotki signalov* [Mathematical Fundamentals of signal processing]. Tomsk, Tomsk polytechnic university Publ. house, 2011. 212 p.
 23. Bortakovskiy A.S., Panteleev A.V. *Analiticheskaya geometriya v primerakh i zadachakh* [Analytic geometry in examples and tasks]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2005. 496 p.
 24. Shubin S.S., Yamaliev V.U., Glazyrin A.S., Bunkov D.S., Kladiyev S.N., Rakov I.V., Bolovin E.V., Kovalev V.Z., Khamitov R.N. Estimation of submersible induction motor equivalent circuit parameters based on test data. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 1, pp. 204–214. In Rus. Available at: <https://doi.org/10.18799/24131830/2021/1/3013> (accessed 15 February 2022).
 25. Kovalev V.Z., Arkhipova O.V., Esin S.S., Tatevosyan A.A., Scherbakov A.G. Identification of mathematical models parameters of electromechanical consumers of regionally isolated electro-technical complexes. *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, vol. 1260, Iss. 5, pp. 1–7. Available at: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1260/5/052014> (accessed 15 February 2022).
 26. Glazyrin A.S., Nabunskiy I.A., Bannov D.M., Antyaskin D.I., Bunkov D.S., Rakov I.V., Bolovin E.V., Kladiyev S.N., Polishchuk V.I. *Ustroystvo dlya diagnostiki sostoyaniya asinkhronnogo elektrodvigateleya* [Device for diagnostics of induction electric motor condition]. Patent RF, no. 2763849, 2022.

Received: 16 May 2022.

Information about the authors

Dmitriy M. Bannov, engineer, Samara State Technical University.

УДК 556.332.52(571.1)

ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ РАЗРАБОТКИ И ГИДРОГЕОХИМИЯ ДРЕНАЖНЫХ ВОД ГРАНИТНОГО КАРЬЕРА БОРОК

Сухорукова Анна Федоровна^{1,2},
SukhorukovaAF@ipgg.sbras.ru

¹ Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3/6.

² Новосибирский национальный исследовательский государственный университет,
Россия, 630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 1.

Актуальность исследования определяется необходимостью современной оценки гидрогеологических условий разработки и гидрогеохимии дренажных вод гранитного карьера Борок, расположенного в черте крупного Сибирского мегаполиса – города Новосибирска.

Цель: изучить современный водоприток и особенности химического и радионуклидного состава вод карьера.

Методы. Отбор проб выполнялся в соответствии с общепринятыми методиками. Лабораторное изучение химического состава методами титриметрии, ионной хроматографии, масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой проводилось в проблемной научно-исследовательской лаборатории гидрогеохимии Инженерной школы природных ресурсов Томского политехнического университета.

Результаты. В 2019–2021 гг. были отобраны пробы дренажных вод гранитного карьера Борок и реки Иня (выше и ниже места сброса дренажных вод из карьера). Обобщены данные по водопритокам за последние 70 лет, и обоснована роль основных водоносных горизонтов и атмосферных осадков в обводнении карьера в течение года. Выявлены гидрогеохимические особенности дренажных вод карьера (зон развития роговиков и гранитоидов), включая распределение широкого спектра химических элементов (от Li до U). Воды характеризуются $Cl-SO_4-HCO_3 Na-Mg-Ca$ и $SO_4-HCO_3 Na-Mg-Ca$ составом. Величина общей минерализации варьирует в интервале 572–697 мг/дм³, содержание кремния – 0,89–10,53 мг/дм³. Параметры среды отвечают окислительной геохимической обстановке с величинами pH от 7,6 до 8,5; Eh от +150,2 до +261,0 мВ и $O_{расств.}$ от 3,6 до 11,5 мг/дм³. Концентрация природных радионуклидов составляет (мг/дм³): ²³⁸U (9,30·10⁻³–0,21), ²³²Th (1,00·10⁻⁶–9,62·10⁻⁵). Активность радона (²²²Rn) варьирует в интервале от 1 до 89 Бк/дм³.

Ключевые слова:

Гидрогеологические условия разработки, геохимия дренажных вод, уран, торий, радон, водопритоки, гранитный карьер Борок, город Новосибирск, Западная Сибирь.

Введение

В пределах Новосибирской городской агломерации и в ее окрестностях в настоящее время разрабатывается несколько гранитных карьеров разной степени обводненности – Борок, Мочище, Скала и Новобибеево. Известны затопленные карьеры, которые в настоящее время используются в городском хозяйстве в рекреационных целях, – Горский и Тулинский. Несмотря на длительное время их эксплуатации, до настоящего времени практически не проводились исследования химического состава дренажных вод, в том числе распределения в них радионуклидов. Результаты исследований по природным водам города Новосибирска и их радионуклидному составу приведены в работах В.К. Гусева, Е.К. Вериги, Д.А. Новикова, А.Ф. Сухоруковой и др. [1–10].

Содержание радионуклидов в гидросфере Земли варьирует в широких пределах. Проблема радиоактивности вод разрабатываемых месторождений полезных ископаемых и их влиянию на радиоэкологическую обстановку посвящено множество работ как российских, так и зарубежных авторов, из последних исследований необходимо отметить публикаций А.А. Конышева, Е.Д. Сидкиной, В.И. Мальковского, G. Manjón, J. Mantero, S. Mishra, S. Mitra, B. Cho, D. Kim, M. Kim, J. Hwang, C. Choo, E.B. Faweya, V.S.P. Adithya, T.A. Przylibski, J. Knežević, C. Yu, F.S. Olise [11–25].

Карьер Борок расположен в южной части Октябрьского района г. Новосибирска, в правом борту р. Иня, в 500 м от места впадения ее в Обь (рис. 1, а). В 200–250 м на юге от него – шоссе и железнодорожная линия, соединяющие г. Новосибирск с Алтайским краем и Кузбассом.

Эксплуатация месторождения началась кустарными разработками еще в конце XIX в. для строительных нужд быстро развивающегося города (тогда еще Ново-николаевска) и Транссибирской железнодорожной магистрали. Официальной датой открытия карьера, который разрабатывался местными организациями для нужд города до 1935 г., затем перешел в систему Наркомата путей сообщения и эксплуатировался Томской железной дорогой, считается 1908 г. Карьер был заложен в холме с сосновым бором, отсюда произошло название Борок. По имеющимся фондовым данным, запасы по категории А составляли в 1950–1980-х гг. прошлого века от 2300 до 4500 тыс. м³, в начале 2000-х гг. – 400–900 тыс. м³. Продукция карьера сертифицирована для производства строительного щебня, декларирована для дорожного строительства. За всю историю его эксплуатации, по грубым подсчетам, добыто более 40 млн т каменного материала.

Несмотря на длительное время разработки гранитных карьеров в черте города, до настоящего времени практически не проводились исследования химиче-

ского состава дренажных вод, в том числе распределения в них радионуклидов. В 70–80-х гг. прошлого века гидрогеологическими партиями и отрядами НГПЭ ПГО «Новосибирскгеология» был проведен большой объем поисковых работ на минеральные радоновые воды в городе и его окрестностях. Выявлены 12 месторождений радоновых вод. Получены первые данные по химическому составу подземных вод различных горизонтов, содержаниям радионуклидов в водах и вмещающих породах, которые не были опубликованы в открытой печати, а хранятся в фондах Территориального геологического управления по Новосибирскому округу.

Научный интерес по изучению распределения и форм миграции радиоактивных элементов в природных подземных водах существенно вырос за последнее десятилетие. Исследователи из более чем 40 стран мира (Европы, Америки, Восточной и Южной Азии, Среднего Востока, Африки), где распространены массивы гранитоидов, активно публикуют новые данные по содержаниям урана и радона в зависимости от состава водовмещающих пород и окислительно-восстановительных условий. Проводится оценка характеристик регионального фона. Особое внимание уделяется возможным негативным последствиям воздействия радионуклидов на загрязнение водных ресурсов и здоровье человека [6, 15–17, 20–23, 26–28].

Фактический материал и методика исследования

В рамках настоящих исследований были обобщены материалы ООО «Горно-добывающая компания» (г. Новосибирск) по водопритокам в карьер Борок и составлена электронная база данных общим объемом более 1500 записей. Во время полевых работ 2019–2020 гг. отобрано 17 проб воды. Опробованы все выходы подземных вод на поверхность в бортах карьера, в старом карьере, зумпфах, служащих накопителями воды, скважинах, пройденных для взрывных работ, а также поверхностные вод реки Иня выше и ниже места сброса дренажных вод карьера (рис. 1). Во время экспедиционных работ непосредственно на объектах было выполнено определение pH, Eh, температуры, содержания растворенного O_2 , HCO_3^- с помощью оборудования (Hanna HI9125, кислородомер АКПМ-1-02Л) и полевой гидрогеохимической лаборатории. Измерение содержания радона в природных водах проводилось на комплексе «Альфарад плюс» в лаборатории гидрогеологии осадочных бассейнов Сибири ИНГГ СО РАН. Лабораторное изучение химического состава вод проводилось методами титриметрии, ионной хроматографии, масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой в ПНИЛ гидрогеохимии ИШПР ТПУ. Данные по количеству атмосферных осадков и среднесуточной температуре за анализируемый период были взяты с информационного портала «Погода и климат» [29].

Результаты исследования и обсуждение

Геологическое строение и гидрогеологические условия

Месторождение карьер Борок приурочено к юго-восточному контакту Новосибирского верхнепалеозойского массива гранитоидов ($\epsilon_{T_3}P_3 - T_1P_2$) с песчано-

глинистыми сланцами пачинской свиты верхнего девона ($D_3p\epsilon$), которые в результате контактового метаморфизма превращены в роговики [30]. Гранитоиды и роговики пронизаны многочисленными дайками кислого состава, реже дайками лампрофиров. Толща разбита несколькими системами трещин, гранитоиды имеют глыбовую или столбчатую отдельность, в роговиках плитчатая отдельность, отмечены зоны интенсивной трещиноватости. Контакт гранитоидов с роговиками общего северо-восточного простирания, линия неправильная, изрезанная, фистончатая.

Среди гранитоидов преобладают биотит-амфиболовые граниты, субщелочные двуполощпатовые порфиридные граниты, лейкограниты. В минеральном составе пород содержание кварца от 25 до 35 %, плагиоклаза от 20 до 45 %, калишпата от 20 до 40 %, биотита от 3 до 5 %, роговая обманка до 5 %. Акцессорные минералы: сфен, циркон, апатит, рутил, ортит. Роговики – темно-серые, почти черные, или светло-серые, слабо-зеленоватые тонкозернистые, очень плотные породы с шероховато-раковистым изломом. Структура гетерогранобластовая. Темные разности имеют существенно кварц-биотитовый состав, светлые – кварц-диопсидовый, встречаются роговообманковые разновидности.

Палеозойские породы до начала эксплуатации месторождения практически на всей площади были перекрыты осадками четвертичного возраста первой надпойменной и пойменной террас рек Обь и Иня мощностью до 5–12 м. К настоящему времени в контуре разведки полностью удалены рыхлые, скальные вскрышные породы и породы верхней трещиноватой зоны, связанной с процессами выветривания.

В пределах месторождения гранитоиды имеют зональное строение, в направлении к контакту происходит смена биотит-роговообманковых гранитов на гранодиориты, а иногда и на кварцевые диориты. Восточную часть месторождения слагают роговообманковые роговики (рис. 1, б). Соотношение этих петрографических разновидностей пород (гранитоидов и роговиков) на текущий момент в составе полезной толщи, исходя из площадного распространения, составляет 43:57 %.

В процессе разведки и эксплуатации месторождения карьер Борок проводился крайне малый объем гидрогеологических исследований, в 70-е годы прошлого века определялись фильтрационные свойства пород и водопритоки в карьер, получены единичные значения по концентрации радона и химического состава воды. Первая гидрогеологическая характеристика месторождения была дана в 1955 г. в рамках отчета о геологоразведочных работах под руководством Г.В. Баландина. Исследования карьера Борок 70–80-х гг. прошлого века связаны с именами геологов и гидрогеологов Новосибирской геологопоисковой экспедиции (А.В. Павлов, В.И. Грязнова, Г.Т. Голодняк, В.Н. Лукьяшко, Л.Е. Ударцева, Г.Ф. Вавилихин и другие).

В пределах карьера выделяется водоносный горизонт аллювиальных четвертичных отложений (супеси, суглинки и песчано-гравийно-галечниковые отложе-

ния). Режим грунтовых аллювиальных вод находится в прямой зависимости от режима рек Иня и Обь и количества выпадающих атмосферных осадков. По результатам опытных работ удельные дебиты скважин составляют 0,1–0,6 л/с при среднем коэффициенте фильтрации 4,8 м/сут и средней водопроницаемости 47,0 м²/сут.

Ниже залегает водоносный горизонт палеозойских интрузивов, представленный в основном гранитами. Воды трещинно-жильные, напорные. По результатам

опытных откачек палеозойские образования характеризуются невысокой водообильностью со средним удельным дебитом скважин 0,02 л/с. Средние величины коэффициента фильтрации составляют 1,4 м/сут, а коэффициента водопроницаемости – не более 1 м²/сут. Питание осуществляется посредством межпластовых перетоков из вышележащего четвертичного горизонта, дренажа из реки Иня и атмосферными осадками.

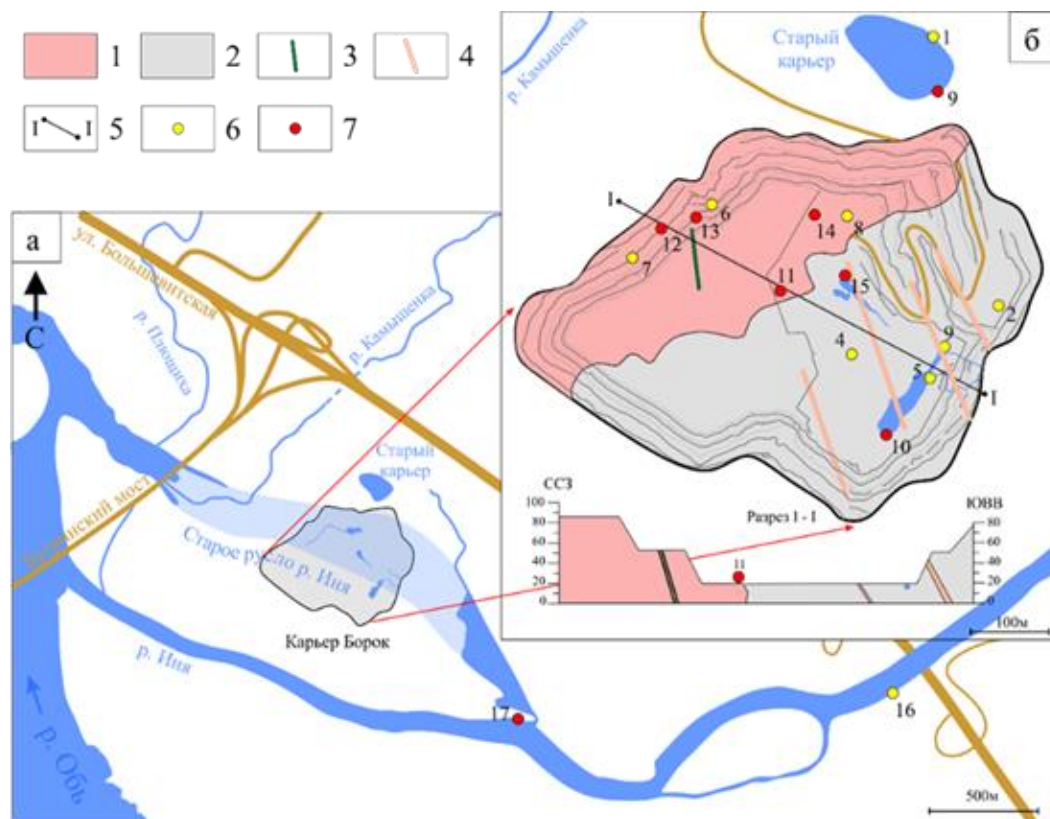


Рис. 1. Местоположение карьера Борок (а) и схема геологического строения (б). 1 – гранитоиды; 2 – роговики; 3 – лампрофиры; 4 – гранодиориты; 5 – линия разреза; 6 – точки отбора проб 1–8, 16 (2019 г.): 1 – старый карьер (северная часть), 2 – источник I, 3 – источник II, 4 – зумпф I, 5 – источник III, 6 – источник IV, 7 – источник V, 8 – зумпф II, 16 – река Иня; 7 – точки отбора проб 9–15 (2020 г.): 9 – старый карьер (восточная часть), 10 – источник VI, 11 – скважина I, 12 – источник VII, 13 – источник VIII, 14 – зумпф III, 15 – зумпф IV, 17 – река Иня

Fig. 1. Location of the Borok quarry (a) and the scheme of the geological structure (b). 1 – granitoids; 2 – hornfelses; 3 – lamprophyres; 4 – granodiorites; 5 – cut line; 6 – sampling points 1–8, 16 (2019); 1 – old quarry (northern part), 2 – source I, 3 – source II, 4 – sump I, 5 – source III, 6 – source IV, 7 – spring V, 8 – sump II, 16 – river Inya; 7 – sampling points 9–15 (2020): 9 – old quarry (eastern part), 10 – source VI, 11 – well I, 12 – source VII, 13 – source VIII, 14 – sump III, 15 – sump IV, 17 – river Inya

За более чем 100 летнюю эксплуатацию карьера его площадь и глубина существенно увеличились, что привело к значительному изменению гидрогеологических условий месторождения. Если в начале прошлого века оно представляло собой останец, возвышающийся над окружающей поверхностью, то в настоящее время это карьер глубиной более 80 м (абсолютная отметка дна рабочей зоны +10 м). Также значительно увеличилась площадь карьера (более чем в 10 раз), если в 1954 г. она составляла около 27300 м² при глубине карьера 22 м, то в 2020 г. уже 345000 м². В настоящее время старый карьер используется как водосборник, из которого ведется от-

качка и сброс дренажных вод в искусственно образованный ручей, впадающий в реку Иня. В связи с необходимостью увеличения добычи каменного материала в 1988 г. русло реки Иня было перенаправлено (приблизительно 500 м на юго-запад) в протоку Курья, что существенно изменило гидрогеологическую обстановку в зоне активного водообмена (рис. 1, а). До отвода русла реки Иня рассчитанные притоки в карьер были выше в 2–2,5 раза, по сравнению с фактическими притоками в 2019–2020 гг. Это свидетельствует об уменьшении доли вод аллювиального водоносного горизонта в общем водопри- токе в настоящее время.

Современные водопритоки в карьер

С первых лет эксплуатации карьера существует необходимость постоянных откачек воды; в послевоенном 1947 г. работа карьера была приостановлена и карьер был полностью затоплен. Гидрогеологические условия карьера Борок достаточно сложные, и питание водоносных горизонтов определяется дренажом из реки Иня и количеством атмосферных осадков. Главным фактором, определяющим основные черты режима подземных вод на месторождении, является гидрологический режим, свойственный реке Иня.

В период с 1950 по 1980 гг. предпринимались попытки оценить роль трещинно-жильных вод палеозойских гранитов, четвертичного водоносного горизонта и атмосферных осадков вод в общем объеме дренажных вод. Приток за счет атмосферных осадков оценивался как поверхностный сток при сформированной водосборной площади и среднегодовом количестве осадков. При этом четких критериев по разделению объемов притока не было разработано.

Реального учета откачиваемых объемов вод не велось вплоть до 2019 г. (рис. 2). Поэтому анализ расчи-

танных объемов вод, учитываемых в прошлые годы при эксплуатации месторождения, показал значительное завышение этих величин по сравнению с реальными (более чем в два раза). Особенно сильно завышение прослеживалось в летние месяцы. Автоматический учет водопритоков 2019–2020 гг. (по данным ООО «Горнодобывающая компания») показал, что реальные цифры варьируют в пределах 2,24–2,35 млн м³ в год.

Принимая во внимание современные материалы по объемам водопритоков в карьер, была выполнена вероятностная оценка доли трещинно-жильных вод в его обводнении. В холодный период года (с ноября по март) водоприток в карьер за счет атмосферных осадков в виде дождя отсутствовал (рис. 2), а инфильтрация из водоносного горизонта аллювиальных четвертичных отложений была минимальной. Средний водоприток в это время составлял около 5100 м³/сут, и его можно считать поступающим из трещиноватых палеозойских пород. С мая по октябрь объемы дренажных вод увеличились до 6400 м³/сут, и разницу (в среднем 1300 м³/сут) можно отнести ко вкладу атмосферных осадков и вод четвертичных отложений.

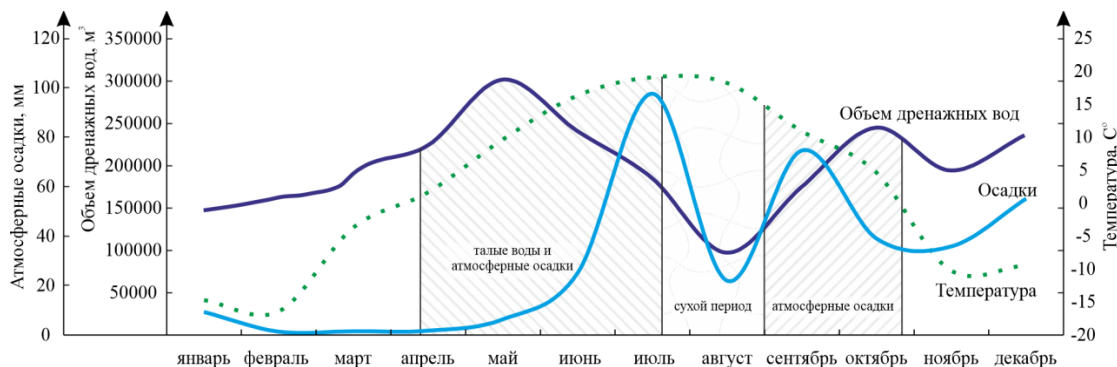


Рис. 2. Объемы дренажных вод карьера Борок в соответствии с количеством атмосферных осадков и среднесуточной температурой в 2019 г.

Fig. 2. Borok quarry drainage water volumes in accordance with the amount of precipitation and average daily temperature in 2019

По данным И.В. Фёклиной длительная эксплуатация карьера привела к формированию депрессионной воронки с радиусом влияния не менее 3200 м, деформированной в восточном-северо-восточном направлении (в противоположную сторону от рек Иня и Обь). Как показывают результаты мониторинговых наблюдений, значительных изменений в существующем режиме вод, связанных с четвертичными отложениями и породами палеозоя, при дальнейшей эксплуатации карьера не ожидается. В настоящее время объем карьера составляет 17,7 млн м³. При среднегодовом водопритоке в размере 2,3 млн м³ карьер без постоянных откачек полностью заполнится водой приблизительно за 8 лет.

Геохимия дренажных вод

Рассмотрим особенности дренажных вод карьера Борок. В результате анализа полученных данных по химическому и радионуклидному составу выделены следующие группы – трещинно-жильные воды зоны распространения гранитоидов (группа I), зоны распространения роговиков (группа II), а также воды старого

накопительного карьера (группа III) (табл. 1, 2), где по системе временных трубопроводов накапливается постоянно откачиваемая вода. Здесь же приведен состав вод реки Иня (группа IV) выше и ниже по течению от места впадения искусственного ручья, по которому сбрасываются дренажные воды из карьера.

Группа I характеризуется Cl-SO₄-HCO₃ Na-Mg-Ca и SO₄-HCO₃ Na-Mg-Ca составом с величиной общей минерализации от 572 до 652 мг/дм³ и содержанием кремния от 4,8 до 10,5 мг/дм³, железа в среднем 0,15 мг/дм³, перманганатной окисляемостью от 0,8 до 2,1 мг/дм³. Параметры среды отвечают окислительной геохимической обстановке с величинами pH от 7,6 до 8,5; Eh от +150,2 до +244,7 мВ и O₂раств. от 3,9 до 11,5 мг/дм³. Содержания радионуклидов в водах группы I составляют (мг/дм³): ²³⁸U от 0,9·10⁻² до 10,1·10⁻² и ²³²Th от 1,00·10⁻⁶ до 9,6·10⁻⁵ (табл. 2, рис. 3). ²³²Th/²³⁸U отношение в водах изменяется в интервале от 1,0·10⁻⁴ до 5,8·10⁻³ при среднем 3,1·10⁻⁴. Активность радона варьирует в пределах от 16 до 89 Бк/дм³. При выполненных в 70–80-е гг. прошлого

века единичных замерах активности радона значения составляли 30–140 Бк/дм³. Невысокую активность ²²²Rn в водах следует связывать с местона-

хождением карьера Борок в зоне контакта Новосибирского гранитоидного массива с песчано-глинистыми сланцами.

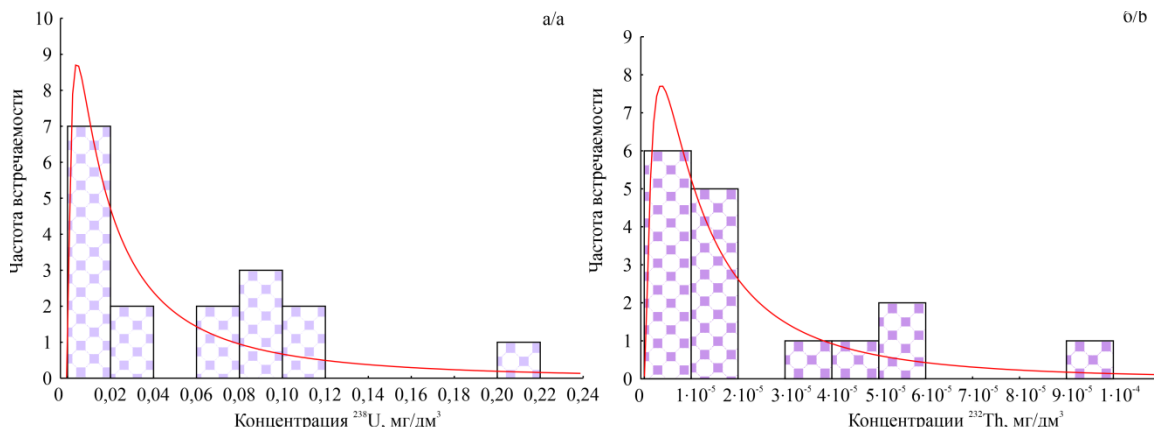


Рис. 3. Распределение U и Th в дренажных водах карьера Борок

Fig. 3. Distribution of U and Th in the drainage waters of the Borok quarry

Группа II – это воды с Cl-SO₄-HCO₃ Mg-Na-Ca составом и средними значениями (мг/дм³): минерализации 665, концентрациями кремния 5,4 и железа 0,12. Параметры геохимической среды этой группы также отвечают окислительной обстановке, при этом величина pH практически не меняется и в среднем составляет 8,2; Eh варьирует от +225,2 до +256,3 мВ и O₂раств. от 8,5 до 11,2 мг/дм³. Близкий химический состав дренажных вод

карьера объясняется большим влиянием реки Иня. Необходимо отметить существенное различие в концентрациях урана, тория и радона в них (табл. 2). При этом в трещинно-жильных водах зоны распространения роговиков концентрации радионуклидов значительно ниже (по урану в 2,5, а по торию в 4 раза), чем в водах первой группы. Активность радона в водах не превышает 38 Бк/дм³ при среднем значении 15 Бк/дм³.

Таблица 1. Химический состав вод карьера Борок и реки Иня

Table 1. Chemical composition of the waters of the Borok quarry and the Inya River

№ по рис. 1 No. in Fig. 1	Дата отбора Selection date	pH	Eh, мВ mV	O ₂ , мг/дм ³ mg/dm ³	П.ок.	Элементы, мг/дм ³ /Elements, mg/dm ³											M, мг/дм ³ mg/dm ³	Химический тип** Chemical type**
						Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	Si ⁴⁺	Fe ²⁺			
Трещинно-жильные воды зоны распространения гранитоидов/Fissure-vein waters of the zone of distribution of granitoids																		
6	21.05.2019	8,3	244,7	11,5	1,6	99	22,0	34,6	2,7	388	58	5,1	1,7	6,0	0,10	630	SO ₄ -HCO ₃ Mg-Na-Ca	
7	21.05.2019	8,5	215,8	11,1	1,4	95	18,0	31,6	5,0	386	61	5,3	1,4	5,0	0,15	603	SO ₄ -HCO ₃ Mg-Na-Ca	
8	21.05.2019	7,8	222,3	9,4	1,6	84	18,0	36,3	3,9	364	54	5,1	7,1	6,9	0,10	572	SO ₄ -HCO ₃ Mg-Na-Ca	
11	06.07.2020	7,6	192,6	4,1	2,1	95	21,9	49,9	6,2	320	118	27,6	17,2	10,5	0,11	663	Cl-SO ₄ -HCO ₃ Mg-Na-Ca	
12	06.07.2020	7,6	222,4	3,9	1,9	95	24,9	41,7	2,3	346	91	27,0	4,5	7,9	0,07	643	Cl-SO ₄ -HCO ₃ Mg-Na-Ca	
13	06.07.2020	7,9	209,7	8,9	1,3	89	20,7	36,3	4,7	331	56	36,7	1,8	4,8	0,11	582	Cl-SO ₄ -HCO ₃ Mg-Na-Ca	
14	06.07.2020	7,9	201,7	7,5	1,0	101	21,9	40,9	4,5	352	77	40,8	5,4	6,6	0,17	652	Cl-SO ₄ -HCO ₃ Mg-Na-Ca	
15	06.07.2020	8,0	150,2	7,1	0,8	91	20,7	43,3	3,9	272	116	33,9	17,0	7,1	0,11	605	Cl-SO ₄ -HCO ₃ Mg-Na-Ca	
Среднее значение Mean		7,9	215,6	8,1	1,5	93	21,0	39,0	4,2	345	79	22,7	7,0	6,9	0,15	619	–	
Трещинно-жильные воды зоны распространения роговиков/Fissure-vein waters of the zone of distribution of hornfelses																		
2	21.05.2019	8,1	225,2	10,6	1,6	109	25,0	41,2	4	371	107	32	6,8	0,89	0,12	696	Cl-SO ₄ -HCO ₃ Mg-Na-Ca	
3	21.05.2019	8,3	256,3	10,9	1,0	102	18,5	54,4	3,9	378	90	33,8	5,95	7,07	0,11	687	Cl-SO ₄ -HCO ₃ Mg-Na-Ca	
4	21.05.2019	8,0	233,3	9,61	1,2	102	25,0	37,6	3,1	366	89	34,5	5,15	5,89	0,11	662	Cl-SO ₄ -HCO ₃ Mg-Na-Ca	
5	21.05.2019	8,3	246,5	11,2	1,0	90	20,7	44,7	3,6	348	82	28,1	1,72	6,7	0,10	619	Cl-SO ₄ -HCO ₃ Mg-Na-Ca	
10	06.07.2020	8,2	256,3	8,5	1,1	94	24,4	37,2	3,86	308	113	28,7	0,92	6,7	0,18	663	Cl-SO ₄ -HCO ₃ Mg-Na-Ca	
Среднее значение Mean		8,2	227,0	9,7	1,2	99	22,7	43,0	3,7	354	96	31	4,0	5,45	0,12	665	–	
Воды старого карьера (накопительного)/Waters of the old quarry (accumulative)																		
1	21.05.2019	8,2	261,0	9,3	1,6	101	22,0	49,6	4,2	378	96	37,6	8,56	6,98	0,17	697	Cl-SO ₄ -HCO ₃ Mg-Na-Ca	
9	06.07.2020	7,6	194,3	3,6	0,80	97	25,6	44,0	4,65	319	111	35,6	14,1	7,74	0,13	660	Cl-SO ₄ -HCO ₃ Mg-Na-Ca	
Воды реки Иня/Waters of the Inya river																		
16	04.05.2019	8,5	235,0	13,8	2,7	28	14,0	28,5	1,34	174	33,6	7,8	0,13	0,14	0,03	286	SO ₄ -HCO ₃ Mg-Ca -Na	
17	06.07.2020	8,6	165,6	7,6	1,1	51	18,3	78,7	1,95	354	48,3	18,5	0,09	1,94	0,12	576	Cl-SO ₄ -HCO ₃ Mg-Ca -Na	

Примечание: «–» отсутствие данных; * – название химического типа дано по классификации С.А. Шукарева (в формулу добавлены макрокомпоненты с содержанием >10 %-экв).

Note: «–» data missing; * – name of the chemical type is given according to the classification of S.A. Shchukarev (macro-components with a content of >10 % eq have been added to the formula).

Воды старого накопительного карьера (группа III) пресные и отвечают $\text{Cl-SO}_4\text{-HCO}_3$ Mg-Na-Ca составу. Химический состав и концентрация радионуклидов существенно меняется в зависимости от того, в какой части карьера ведутся работы и откуда поступают воды.

Воды реки Инья отличаются $\text{SO}_4\text{-HCO}_3$ Mg-Ca-Na и $\text{SO}_4\text{-HCO}_3$ Mg-Na составом с величиной общей минерализации 286–576 мг/дм³ и содержанием кремния 0,14–1,94 мг/дм³. Параметры среды также отвечают окислительной обстановке с величинами pH 8,5–8,6; Eh +165,6–+235,0 мВ и $\text{O}_{2\text{раств}}$ 7,6–13,8 мг/дм³. Состав речных вод свидетельствует об активном накоплении в водах натрия (до 78,7 мг/дм³) за счет процессов антропогенного загрязнения в черте города (табл. 1, 2) [20]. Активность радона в речных водах не превышает 2 Бк/дм³. Концентрации урана практически одинаковы в речных водах выше и ниже по течению от места сбора карьерных вод, а тория на порядок выше. Выше по течению $^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$ отношение составляет $1,32 \cdot 10^{-3}$, а ниже – $5,79 \cdot 10^{-3}$.

Радионуклидный состав дренажных вод карьера Борок

Анализ имеющихся фондовых материалов показал, что ранее радионуклидный состав дренажных вод карьера практически не изучался и содержания тория не определялись. В отчетных материалах за 1976 и 1983 гг. приводятся данные по концентрациям урана, которые варьировали в широких пределах от $1,8 \cdot 10^{-4}$ до 0,21 мг/дм³. Необходимо отметить, что радиационный фон закономерно повышается в той части карьера, где вскрыты гранитоиды, достигая максимального значения 50 мкР/ч. На юго-западе, в области распространения

роговиков, среднее значение составляет 21 мкР/ч, а за пределами карьера на берегах реки Инья – не более 12 мкР/ч (табл. 2). Данные по распределению тория для всех групп рассматриваемых вод получены впервые.

Концентрации содержания урана в водах гранитных массивов других регионов страны и мира опубликованы в работах А.Н. Токарева, Н.А. Титаевой, Л.П. Рихванова, С.Л. Шварцева. Содержание урана, по данным вышеуказанных авторов, в водах равнинных рек составляет от $2 \cdot 10^{-5}$ до $5 \cdot 10^{-3}$ мг/дм³, в зонах распространения кислых магматических пород – $2 \cdot 10^{-4}$ до $8 \cdot 10^{-3}$ мг/дм³. В публикациях иностранных авторов основное внимание уделяется концентрации радона в водах гранитных массивов, использующихся для питьевого водоснабжения населения.

Для оценки количества выносимого дренажными водами карьера урана и тория наибольший интерес представляют трещинно-жильные воды гранитоидов, для которых определены максимальные концентрации урана и тория (табл. 2). В течение двух полевых сезонов были опробованы все выходы подземных вод на территории карьера (рис. 4). В изученные объекты входили: старый накопительный карьер, который служит в настоящее время местом сбора вод; зумпфы глубиной от 3 до 5 м; источники (выходы вод в виде водопадов) смешанного происхождения из бортов карьера; скважины глубиной до 11 м, пройденные для взрывных работ. По периметру карьера образуются временные ручьи, собирающиеся в временных зумпфах, из которых проводится откачка воды.

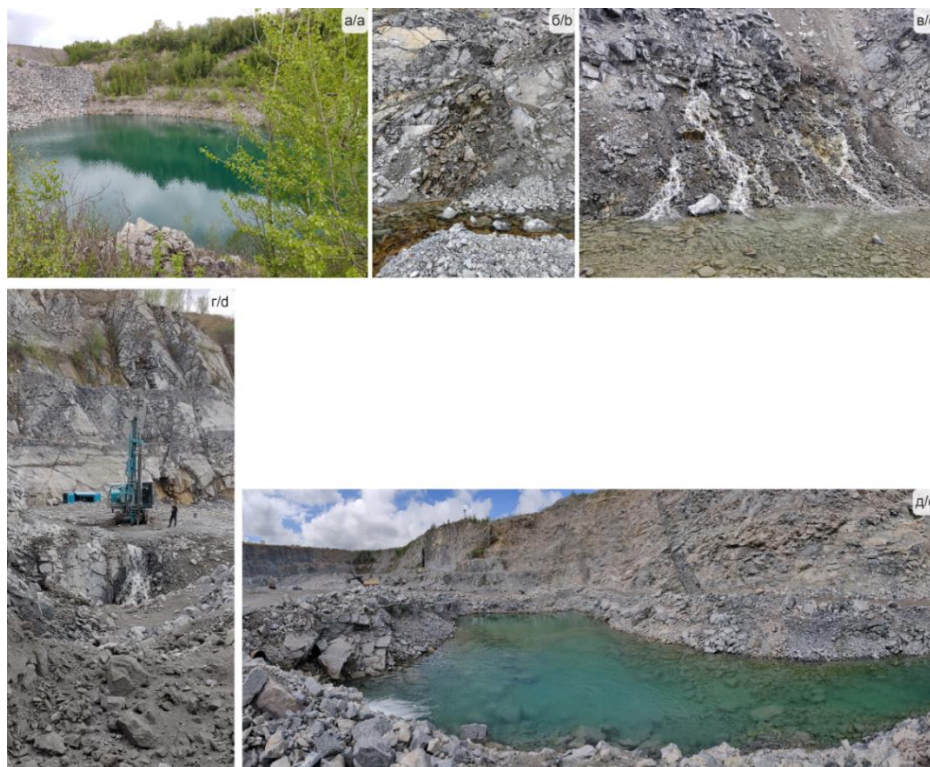


Рис. 4. Места отбора дренажных вод карьера Борок: старый накопительный карьер (а); выходы воды в виде источников в бортах и дне карьера (б–г); зумпф (д)

Fig. 4. Borok quarry drainage water sampling points: old accumulative quarry (a); water outlets in the form of sources in the sides and bottom of the quarry (b–d); sump (e)

Таблица 2. Радионуклидный состав дренажных вод карьера Борок и реки Иня

Table 2. Radionuclide composition of drainage waters of the Borok quarry and the Inya river

№ на рис. 1 No. in Fig. 1	Радиационный фон, мкР/ч Radiation background, $\mu\text{R/h}$	pH	Eh, мВ/мВ	O _{2раств.}	U	Th	Th/U	Rn, Бк/дм ³ Bk/dm ³
				мг/дм ³ /mg/dm ³				
Трещинно-жилльные воды гранитоидов/Fissure-vein waters of granitoids								
6	26	8,3	244,7	11,5	0,9·10 ⁻²	6,5·10 ⁻⁶	7,2·10 ⁻⁴	18
7	28	8,5	215,8	11,1	1,0·10 ⁻²	1,0·10 ⁻⁶	1,0·10 ⁻⁴	16
8	37	7,8	222,3	9,4	8,7·10 ⁻²	1,0·10 ⁻⁵	1,1·10 ⁻⁴	55
11	48	7,6	192,6	4,1	21,1·10 ⁻²	5,5·10 ⁻⁵	2,6·10 ⁻⁴	88
12	50	7,6	222,4	3,9	10,1·10 ⁻²	3,9·10 ⁻⁵	3,9·10 ⁻⁴	43
13	34	7,9	209,7	8,9	7,2·10 ⁻²	1,5·10 ⁻⁵	2,1·10 ⁻⁴	89
14	40	7,9	201,7	7,5	9,2·10 ⁻²	9,6·10 ⁻⁵	1,0·10 ⁻⁴	51
15	39	8,00	150,2	7,1	7,9·10 ⁻²	4,6·10 ⁻⁵	5,8·10 ⁻⁴	57
Среднее/Mean	38	7,9	207,4	7,9	8,3·10 ⁻²	4,2·10 ⁻⁵	3,1·10 ⁻⁴	53
Трещинно-жилльные воды роговиков/Fissure-vein waters of hornfelses								
2	14	8,1	225,2	10,6	1,1·10 ⁻²	1,2·10 ⁻⁵	1,1·10 ⁻³	19
3	17	8,3	256,3	10,9	8,0·10 ⁻²	9,9·10 ⁻⁶	1,2·10 ⁻⁴	4
4	14	8,0	233,3	9,6	3,8·10 ⁻²	1,2·10 ⁻⁵	3,2·10 ⁻³	12
5	18	8,3	246,5	11,2	3,0·10 ⁻²	5,4·10 ⁻⁶	1,8·10 ⁻⁴	1
10	23	8,2	256,3	8,5	1,2·10 ⁻²	–	–	38
Среднее/Mean	17	8,2	243,5	10,2	3,4·10 ⁻²	1,0·10 ⁻⁵	1,2·10 ⁻³	15
Воды старого карьера (накопительного)/Waters of the old quarry (accumulative)								
1	20	8,2	261,0	9,3	9,3·10 ⁻²	5,1·10 ⁻⁵	5,5·10 ⁻⁴	17
9	21	7,6	194,3	3,6	11,6·10 ⁻²	1,4·10 ⁻⁵	1,2·10 ⁻⁴	45
Воды реки Иня/Waters of the Inya river								
16	11	8,5	235,0	13,8	2,32·10 ⁻³	3,1·10 ⁻⁶	1,3·10 ⁻³	0,1
17	12	8,6	165,6	7,6	2,40·10 ⁻³	1,4·10 ⁻⁵	5,8·10 ⁻³	0,1

Результаты автоматического учета дренажных вод и актуальные данные по их химическому составу позволили впервые выполнить оценку объемов выносимых ими природных радионуклидов. Так, средние объемы дренажных вод составляют 2,3 млн м³ в год, а концентрации урана – 6,58·10⁻² мг/дм³ и тория – 2,67·10⁻⁵ мг/дм³. При этом условия ежегодные объемы выносимого урана и тория можно оценить как 151,4 и 61,4 кг, соответственно. При этом следует отметить, что загрязнения радиоактивными элементами реки Иня не наблюдается. За счет процессов смешения ее вод с дренажными концентрация ²³⁸U варьируют от 2,32·10⁻³ до 2,40·10⁻³ мг/дм³, а ²³²Th – от 3,08·10⁻⁶ до 1,39·10⁻⁵.

Заключение

В заключении необходимо отметить, что впервые за более чем вековую историю разработки карьера Борок проанализированы гидрогеологические условия и получены актуальные сведения о геохимии дренажных вод. Произошло существенное изменение гидрогеологических условий месторождения за счет переноса русла реки Иня и снижение доли вод аллювиального водоносного горизонта и дренажа из самой реки в общем обводнении карьера. Как показал опыт прошлых лет, эксплуатация карьера без постоянной откачки поступающих вод невозможна.

Установлено, что основной объем воды, поступающий в карьер, относится к трещинно-жилльным водам палеозойских гранитов, при этом их питание происходит за счет аллювиальных вод и вод атмосферных осадков, что определяет их разнообразие по химическому составу. Превалируют воды Cl-SO₄-

HCO₃ Na-Mg-Ca и SO₄-HCO₃ Na-Mg-Ca состава с величиной общей минерализации от 572 до 697 мг/дм³ и содержанием кремния от 0,89 до 10,53 мг/дм³. Параметры среды отвечают окислительной геохимической обстановке с величинами pH от 7,6 до 8,5; Eh от +150,2 до +261,0 мВ и O_{2раств.} от 3,4 до 11,4 мг/дм³.

Максимальные содержания природных радионуклидов составляют: урана до 0,21 мг/дм³, тория до 9,62·10⁻⁵ мг/дм³, а активность радона варьирует в интервале от 1 до 89 Бк/дм³. Невысокие концентрации ²²²Rn в водах следует связывать с местонахождением карьера Борок в зоне контакта Новосибирского гранитоидного массива с песчано-глинистыми сланцами. При этом следует отметить, что загрязнения радиоактивными элементами реки Иня не наблюдается. За счет процессов смешения ее вод с дренажными концентрация ²³⁸U варьируют от 2,32·10⁻³ до 2,40·10⁻³ мг/дм³, а ²³²Th – от 3,08·10⁻⁶ до 1,39·10⁻⁵ мг/дм³.

Данные по радионуклидному составу дренажных вод гранитного карьера Борок не противоречат ранее опубликованным обобщениям по этому вопросу, а полученные впервые концентрации урана и тория в водах Новосибирского гранитного массива позволят в будущих исследованиях обосновать картину природы радиоактивности подземных вод Новосибирской городской агломерации.

Полевые и аналитические работы по изучению химического состава природных вод выполнены при финансовой поддержке проекта Министерства науки и высшего образования РФ № FWZZ-2022-0014, работы по исследованию литолого-минералогических особенностей горных пород – при поддержке проекта Российского научного фонда № 22-17-20029.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вериги Е.К., Быкова В.В., Гусев В.К. Заельцовское месторождение радоновых вод (Новосибирское Приобье) // Новые дан-

ные по геологии и полезным ископаемым Западной Сибири. – 1979. – № 14. – С. 47–51.
 2. Гусев В.К., Вериги Е.К. Радоновые воды Кольвань-Томской складчатой зоны, их использование и охрана // Изменение

- природных условий под влиянием деятельности человека. – Новосибирск: Наука, 1984. – С. 99–107.
3. Новиков Д.А., Сухорукова А.Ф., Корнеева Т.В. Гидрогеология и гидрогеохимия Зельцовско-Мочищенского проявления радоновых вод (юг Западной Сибири) // Геодинамика и тектонофизика. – 2018. – Т. 9. – № 4. – С. 1255–1274.
 4. Гидрогеология и гидрогеохимия месторождения радоновых вод «Каменское» (г. Новосибирск) / Д.А. Новиков, А.Ф. Сухорукова, Т.В. Корнеева, Р.М. Каменова-Тоцева, А.А. Максимова, А.С. Деркачев, Ф.Ф. Дульцев, А.В. Черных // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 4. – С. 192–208.
 5. Изотопно-геохимические особенности проявления слаборадоновых вод «Инские источники» (юг Западной Сибири) / Д.А. Новиков, Ю.Г. Копылова, Л.Г. Вакуленко, А.Ф. Сухорукова, А.Н. Пыряев, А.А. Максимова, Ф.Ф. Дульцев, А.В. Черных // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 3. – С. 135–145.
 6. Росляков Н.А., Жмодик С.М., Пахомов В.Г. Естественные радионуклиды в геологической среде Новосибирской области // Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека: Материалы IV Международной конференции. – Томск, 4–8 июня 2013. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2013. – С. 461–464.
 7. Groundwater composition near the nickel-copper smelting industry on the Kola Peninsula, central Barents Region (NW Russia and NE Norway) / P. De Caritat, S. Danilova, Ø. Jaeger, C. Reimann, G. Storrø // Journal of Hydrology. – 1998. – V. 208. – P. 92–107.
 8. Novikov D.A., Korneeva T.V. Microelements in Radon Waters of the Zaelsovsky field (The Southern Part of West Siberia) // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – V. 1172. – № 1. – № 012096.
 9. Novikov D.A., Dultsev F.F., Chernykh A.V. Role of water-rock interactions in the formation of the composition of radon waters of the Zaelsovsky field (the southern part of West Siberia) // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – V. 1451. – № 012007.
 10. Monitoring of radionuclides in the natural waters of Novosibirsk, Russia / D.A. Novikov, F.F. Dultsev, A.F. Sukhorukova, A.A. Maksimova, A.V. Chernykh, A.S. Derkachov // Groundwater for Sustainable Development. – 2021. – V. 15. – № 100674.
 11. Особенности поведения химических элементов в системе вода–порода района разрабатываемого карьера буттового камня в Питкярянтском рудном районе (Карелия) / А.А. Коньшев, Е.С. Сидкина, Е.А. Солдатова, Д.Н. Догадкин, И.Н. Громьяк // Известия Томского Политехнического Университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 3. – С. 7–19.
 12. Анализ коллоидных форм переноса урана подземными водами на U–Mo-месторождениях Стрельцовского рудного поля (Восточное Забайкалье) / В.И. Мальковский, В.А. Петров, Ю.П. Диков, Е.В. Александрова, Я.В. Бычкова, А.В. Мохов, Л.С. Шулик // Доклады академии наук. – 2014. – Т. 454. – № 1. – С. 81–83.
 13. Замана Л.В., Чечель Л.П. Геохимия дренажных вод горнорудных объектов вольфрамового месторождения месторождения Бом-Горхом (Забайкалье) // Химия в интересах устойчивого развития. – 2014. – Т. 22. – С. 1–7.
 14. Some naturally occurring radionuclides (NORM) in a river affected by acid mining drainages / G. Manjón, J. Mantero, I. Vioque, J. Galván, I. Díaz-Francés, R. García-Tenorio // Chemosphere. – 2019. – V. 223. – P. 536–543.
 15. Mishra S., Maity S., Pandit G.G. Estimation of distribution coefficient of natural radionuclides in soil around uranium mines and its effect with ionic strength of water // Radiation Protection Dosimetry. – 2012. – V. 152. – № 1–3. – P. 229–233.
 16. Assessment of radon (222Rn) activity in groundwater and soil-gas in purulia district, west Bengal, India / S. Mitra, S. Chowdhury, J. Mukherjee, S. Sutradhar, S. Mondal, C. Barman, A. Deb // Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. – 2021. – V. 330 (3). – P. 1331–1338. DOI: 10.1007/s10967-021-07989-1
 17. Hydrogeochemical characteristics of uranium and radon in groundwater from the Goesan area of the Ogcheon metamorphic belt (OMB), Korea / B. Cho, D. Kim, M. Kim, J. Hwang, C. Choo // Sustainability (Switzerland). – 2021. – V. 13 (20). DOI: 10.3390/su132011261
 18. Hwang J., Kim S.W. Occurrence of uranopolymer in pegmatite related to a Jurassic granite pluton in Changwon, South Korea: mineral chemistry and texture of a potential source of uranium and radon in a granite aquifer // Environmental Earth Sciences. – 2021. – V. 80 (14). DOI: 10.1007/s12665-021-09766-5
 19. Radiological implication of 222Rn concentrations in waters from quarries environs, correlation with 226Ra concentrations and rocks geochemistry / E.B. Faweya, O.A. Agbetuyi, A.O. Talabi, T. Adewumi, O. Faweya // Arabian Journal of Geosciences. – 2021. – V. 14 (11). DOI: 10.1007/s10967-022-08240-1
 20. Health risk implication and spatial distribution of radon in groundwater along the lithological contact in south India / V.S.P. Adithya, S. Chidambaram, M.V. Prasanna, S. Venkatramanan, K. Tirumalesh, C. Thivya, R. Thilagavathi // Archives of Environmental Contamination and Toxicology. – 2021. – V. 80 (1). – P. 308–318.
 21. 222Rn concentration in groundwaters circulating in granitoid massifs of Poland / T.A. Przylibski, E. Domin, J. Gorecka, A. Kowalska // Water (Switzerland). – 2020. – V. 12 (3). DOI: 10.3390/w12030748
 22. Estimation of absorbed gamma dose rate from granite by Monte Carlo simulation approach / J. Knežević, P. Kuzmanović, D. Mrdja, N. Todorović, I. Bikit, J. Hansman // Journal of Radiological Protection. – 2020. – V. 40 (2). – P. 596–611.
 23. Radon concentrations in the community groundwater system of South Korea / B.W. Cho, H.K. Kim, M.S. Kim, J.H. Hwang, U. Yoon, S.Y. Cho, C.O. Choo // Environmental Monitoring and Assessment. – 2019. – V. 191. DOI: 10.1007/s10661-019-7301-y
 24. Geochemical controls on dispersion of U and Th in Quaternary deposits, stream water, and aquatic plants in an area with a granite pluton / C. Yu, T. Berger, H. Drake, Z. Song, P. Peltola, M.E. Åström // Science of the Total Environment. – 2019. – V. 663. – P. 16–28.
 25. Olise F.S., Akinagbe D.M., Olasogba O.S. Radionuclides and radon levels in soil and ground water from solid minerals-hosted area, south-western Nigeria // Cogent Environmental Science. – 2016. – V. 2 (1). DOI: 10.1080/23311843.2016.1142344
 26. Рихванов Л.П. Радиоактивность и радиоактивные элементы в гидросфере // Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека. – Томск: Изд-во ТПУ, 2016. – С. 549–557.
 27. Рихванов Л.П. Радиоактивные элементы в окружающей среде и проблемы радиозоологии. – Томск: Изд-во ТПУ, 2009. – 430 с.
 28. Бахур А.Е. Интерпретация природных и техногенных радиоактивных аномалий в объектах окружающей среды // Разведка и охрана недр. – 2018. – № 7. – С. 58–62.
 29. Погода и климат. URL: <http://www.pogodaiklimat.ru/weather.php?id=29638&bday=15&fday=%D0%9F%D0%BE%D1%81%D0%BB%D0%B5%D0%B4%D0%BD%D0%B8%D0%B9+%D0%B4%D0%B5%D0%BD%D1%8C&month=12&year=2020&bot=2> (дата обращения 15.02.2022).
 30. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1000000 (третье поколение). Серия Алтае-Саянская. Лист N-44. Новосибирск. Объяснительная записка / Г.А. Бабин, А.И. Черных, А.Г. Головина, С.В. Жигалов, С.С. Долгушин, Е.В. Ветров, Т.В. Кораблева, Н.А. Бодина, Н.А. Светлова, Г.С. Федосеев, А.П. Хилько, В.А. Елифанов, Ю.И. Лоскутов, И.Ю. Лоскутов, М.В. Михаревич, Е.А. Пихутин. – СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2015. – 392 с.

Поступила 20.04.2022 г.

Информация об авторах

Сухорукова А.Ф., кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник лаборатории гидрогеологии осадочных бассейнов Сибири Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН; доцент кафедры общей и региональной геологии Новосибирского национального исследовательского государственного университета.

UDC 556.332.52(571.1)

HYDROGEOLOGICAL CONDITIONS OF DEVELOPMENT AND HYDROGEOCHEMISTRY OF DRAINAGE WATER OF THE BOROK GRANITE QUARRY

Anna F. Sukhorukova^{1,2},
SukhorukovaAF@ipgg.sbras.ru

¹ Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS,
3/6, Koptyug avenue, Novosibirsk, 630090, Russia.

² Novosibirsk State University,
1, Pirogov street, Novosibirsk, 630090, Russia.

The relevance of the study is determined by the need for a modern assessment of the hydrogeological conditions of development and hydrogeochemistry of drainage waters of the Borok granite quarry, located within the boundaries of a large Siberian metropolis – the city of Novosibirsk.

The aim of the research is to study the features of the chemical composition and evaluate the annual volumes of uranium and thorium carried out by drainage waters.

Methods. Sampling was carried out in accordance with generally accepted methods. Laboratory study of the chemical composition by titrimetry, ion chromatography, inductively coupled plasma mass spectrometry was carried out at the Problem Research Laboratory of Hydrogeochemistry of the TPU School of Natural Resources.

Results. During 2019–2021, the study of the geochemical features of the drainage waters of the Borok granite quarry and the Inya River (above and below the drainage water discharge site) was carried out. The data on water inflows for the last 70 years are summarized and the role of the main aquifers and atmospheric precipitation in the watering of the quarry during the year is substantiated. The hydrogeochemical features of the quarry drainage waters were revealed, including the distribution of a wide range of chemical elements (from Li to U). Waters are characterized by Cl-SO₄-HCO₃ Na-Mg-Ca and SO₄-HCO₃ Na-Mg-Ca composition with TDS from 572 to 697 mg/dm³ and the content of silicon from 0,89 to 10,53 mg/dm³. The environmental parameters correspond to oxidizing geochemical environment with pH values from 7,6 to 8,5; Eh from +150,2 to +261,0 mV and O_{2dissolved} from 3,6 to 11,5 mg/dm³. The contents of natural radionuclides are (mg/dm³): ²³⁸U (9,3·10⁻³–0,2), ²³²Th (1,0·10⁻⁶–9,6·10⁻⁵). The activity of radon (²²²Rn) varies from 1 to 89 Bq/dm³.

Key words:

Hydrogeological conditions of development, drainage water geochemistry, uranium, thorium, radon, water inflows, Borok granite quarry, Novosibirsk city, Western Siberia.

The field and analytical work on chemistry of natural waters was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Projects FSWW-0022-0014 and FSWW-0022-2020). The analytical work on lithological and mineralogical features of rocks was supported by the Russian Science Foundation (Project 22-17-20029).

REFERENCES

- Verigo E.K., Bykova V.V., Gusev V.K. Zaeltsovskoe mestorozhdenie radonnykh vod (Novosibirskoe Pribye) [Zaeltsovsky deposit of radon waters (Novosibirsk Pribye)]. *New data on geology and minerals of Western Siberia*, 1979, Iss. 14, pp. 47–51.
- Gusev V.K., Verigo E.K. Radonovye vody Kolyvan-Tomskoy skladchatoy zony, ikh ispolzovanie i okhrana [Radon waters of the Kolyvan-Tomsk folded zone, their use and protection]. *Izmeneniye prirodnykh usloviy pod vliyaniem deyatel'nosti cheloveka* [Changes in natural conditions under the influence of human activity]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1984, pp. 99–107.
- Novikov D.A., Sukhorukova A.F., Korneeva T.V. Hydrogeology and hydrogeochemistry of the Zaeltsovsko-Mochishchensky zone of radon waters in the southern West Siberia. *Geodynamics & Tectonophysics*, 2018, vol. 9, no. 4, pp. 1255–1274. In Rus.
- Novikov D.A., Sukhorukova A.F., Korneeva T.V., Kamenova-Totzeva R.M., Maksimova A.A., Derkachev A.S., Dultsev F.F., Chernykh A.V. Hydrogeology and hydrogeochemistry of the «Kamenskoe» field of radon-rich waters (Novosibirsk). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 4, pp. 192–208. In Rus.
- Novikov D.A., Kopylova Y.G., Vakulenko L.G., Sukhorukova A.F., Pyrayev A.N., Maksimova A.A., Dultsev F.F., Chernykh A.V. Isotope geochemical features of occurrence of low-radon waters «Inskie springs» (south-western Siberia). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 3, pp. 135–145. In Rus.
- Roslyakov N.A., Zhmodik S.M., Pakhomov V.G. Prirodnye radionuklidy v geologicheskoy srede Novosibirskoy oblasti [Natural radionuclides in the geological environment of the Novosibirsk region]. *Radioaktivnost i radioaktivnye elementy v srede cheloveka. Materialy IV Mezhdunarodnoy konferentsii* [Radioactivity and radioactive elements in the human environment. Materials of the IV International Conference]. Tomsk, June 4–8, 2013. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ. house, 2013, pp. 461–464.
- De Caritat P., Danilova S., Jaeger Ø., Reimann C., Storror G. Groundwater composition near the nickel-copper smelting industry on the Kola Peninsula, central Barents Region (NW Russia and NE Norway). *Journal of Hydrology*, 1998, vol. 208, pp. 92–107.
- Novikov D.A., Korneeva T.V. Microelements in radon waters of the Zaeltsovsky field (the southern part of West Siberia). *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, vol. 1172, no. 1, no. 012096.
- Novikov D.A., Dultsev F.F., Chernykh A.V. Role of water-rock interactions in the formation of the composition of radon waters of the Zaeltsovsky field (the southern part of West Siberia). *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, vol. 1451, no. 012007.
- Novikov D.A., Dultsev F.F., Sukhorukova A.F., Maksimova A.A., Chernykh A.V., Derkachyov A.S. Monitoring of radionuclides in the natural waters of Novosibirsk, Russia. *Groundwater for Sustainable Development*, 2021, vol. 15, pp. 1–8.
- Konyshchev A.A., Sidkina E.S., Soldatova E.A., Dogadkin D.N., Gromyak I.N. Features of chemical element behavior in the water-rock system of the rubble stone quarry in Pitkäranta district (Karelia). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 3, pp. 7–19. In Rus.

12. Malkovskii V.I., Petrov V.A., Dikov Y.P., Aleksandrova E.V., Bychkova Y.V., Mokhov A.V., Shulik L.S. An analysis of the role of colloids in uranium transport in groundwater within the U-Mo deposits of the Strel'tsovskoe ore field (eastern Transbaikalian region). *Doklady Earth Sciences*, 2014, vol. 454, no. 1, pp. 29–31. In Rus.
13. Zamana L.V., Chechel L.P. Geokhimiya drenaznykh vod gornorudnykh ob'ektov volframovogo mestorozhdeniya Bom-Gorkhom (Zabaykalye) [Geochemistry of drainage water of mining objects at the tungsten deposit Bom-Gorkhom (Transbaikalia)]. *Chemistry for Sustainable Development*, 2014, vol. 22, pp. 1–7.
14. Manjón G., Mantero J., Vioque I., Galván J., Díaz-Francés I., García-Tenorio R. Some naturally occurring radionuclides (NORM) in a river affected by acid mining drainages. *Chemosphere*, 2019, vol. 223, pp. 536–543.
15. Mishra S., Maity S., Pandit G.G. Estimation of distribution coefficient of natural radionuclides in soil around uranium mines and its effect with ionic strength of water. *Radiation Protection Dosimetry*, 2012, vol. 152, no. 1–3, pp. 229–233.
16. Mitra S., Chowdhury S., Mukherjee J., Sutradhar S., Mondal S., Barman C., Deb A. Assessment of radon (^{222}Rn) activity in groundwater and soil-gas in purulia district, west Bengal, India. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2021, vol. 330 (3), pp. 1331–1338.
17. Cho B., Kim D., Kim M., Hwang J., Choo C. Hydrogeochemical characteristics of uranium and radon in groundwater from the Goesan area of the Ogcheon metamorphic belt (OMB), Korea. *Sustainability (Switzerland)*, 2021, vol. 13 (20), DOI: 10.3390/sul132011261
18. Hwang, J., Kim S.W. Occurrence of uranopolyrase in pegmatite related to a jurassic granite pluton in cheongwon, South Korea: mineral chemistry and texture of a potential source of uranium and radon in a granite aquifer. *Environmental Earth*, 2021, vol. 80 (14), DOI: 10.1007/s12665-021-09766-5
19. Faweya E.B., Agbetuyi O.A., Talabi A.O., Adewumi T., Faweya O. Radiological implication of ^{222}Rn concentrations in waters from quarries environs, correlation with ^{226}Ra concentrations and rocks geochemistry. *Arabian Journal of Geosciences*, 2021, vol. 14 (11), DOI: 10.1007/s10967-022-08240-1
20. Adithya V.S.P., Chidambaram S., Prasanna M.V., Venkatramanan S., Tirumalesh K., Thivya C., Thilagavathi R. Health risk implication and spatial distribution of radon in groundwater along the lithological contact in south India. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2021, vol. 80 (1), pp. 308–318.
21. Przylibski T.A., Domin E., Gorecka J., Kowalska A. ^{222}Rn concentration in groundwaters circulating in granitoid massifs of Poland. *Water (Switzerland)*, 2020, vol. 12 (3), DOI: 10.3390/w12030748
22. Knežević J., Kuzmanović P., Mrdja D., Todorović N., Bikit I., Hansman J. Estimation of absorbed gamma dose rate from granite by Monte Carlo simulation approach. *Journal of Radiological Protection*, 2020, vol. 40 (2), pp. 596–611.
23. Cho B.W., Kim H.K., Kim M.S., Hwang J.H., Yoon U., Cho S.Y., Choo C.O. Radon concentrations in the community groundwater system of South Korea. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2019, vol. 191 (3). DOI: 10.1007/s10661-019-7301-y
24. Yu C., Berger T., Drake H., Song Z., Peltola P., Åström M.E. Geochemical controls on dispersion of U and Th in Quaternary deposits, stream water, and aquatic plants in an area with a granite pluton. *Science of the Total Environment*, 2019, vol. 663, pp. 16–28.
25. Olise F.S., Akinnagbe D.M., Olasogba O.S. Radionuclides and radon levels in soil and ground water from solid minerals-hosted area, south-western Nigeria. *Cogent Environmental Science*, 2016, vol. 2 (1). DOI: 10.1080/23311843.2016.1142344
26. Rikhvanov L.P. Radioaktivnost i radioaktivnye elementy v gidrosfere [Radioactivity and radioactive elements in the hydrosphere]. *Radioaktivnost i radioaktivnye elementy v srede obitaniya cheloveka* [Radioactivity and radioactive elements in the human environment]. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ. house, 2016. pp. 549–557.
27. Rikhvanov L.P. *Radioaktivnye elementy v okruzhayushchey srede i problemy radioekologii* [Radioactive elements in the environment and problems of radioecology]. Tomsk, TPU Publ. house, 2009. 430 p.
28. Bakhur A.E. Interpreting technogenic and nontechnogenic radioactive anomalies in environmental objects. *Prospect and protection of mineral resources*, 2018, no. 7, pp. 58–62. In Rus.
29. *Pogoda i klimat* [Weather and climate]. Available at: <http://www.pogodaiklimat.ru/weather.php?id=29638&bday=15&fday=%D0%9F%D0%BE%D1%81%D0%BB%D0%B5%D0%B4%D0%BD%D0%B8%D0%B9+%D0%B4%D0%B5%D0%BD%D1%8C&amonth=12&ayear=2020&bot=2> (accessed 15 February 2022).
30. Babin G.A., Chernykh A.I., Golovina A.G., Zhigalov S.V., Dolgushin S.S., Vetrov E.V., Korableva T.V., Bodina N.A., Svetlova N.A., Fedoseev G.S., Khilko A.P., Epifanov V.A., Loskutov Yu.I., Loskutov I.Yu., Mikharevich M.V., Pikhutin E.A. *Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiyskoy Federatsii. Masshtab 1:1000000 (tretye pokoleniye). Seriya Altaye-Sayanskaya. List N-44 – Novosibirsk. Obyasnitelnaya zapiska* [State geological map of the Russian Federation. Scale 1:1000000 (third generation). Altai-Sayan series. Sheet N-44 – Novosibirsk. Explanatory letter]. St. Petersburg, Cartographic factory VSEGEI Publ., 2015. 392 p.

Received: 20 April 2022.

Information about the authors

Anna F. Sukhorukova, Cand. Sc., researcher, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences; associate professor, Novosibirsk State University.

Компьютерная верстка *О.Ю. Аршинова*
Корректурa 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 28.05.2022. Дата выхода журнала: 30.04.2022.
Формат 60x84/8. Бумага «Снегурочка».
Печать XEROX. Усл. печ. л. 25,47. Уч.-изд. л. 23,04.
Заказ 100-22. Тираж 500 экз. Цена свободная.



Издательство

ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Адрес учредителя, редакции, издателя, типографии:
634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, каб. 139.