



ТОМСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

12+

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

**ИЗВЕСТИЯ
ТОМСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
ИНЖИНИРИНГ ГЕОРЕСУРСОВ**

Том 332, № 8, 2021

Издательство
Томского политехнического университета
2021

ИЗВЕСТИЯ ТОМСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА. ИНЖИНИРИНГ ГЕОРЕСУРСОВ

Редакционная коллегия

Семилетов И.П., гл. редактор, д-р геогр. наук (Россия)
Кириянова Л.Г., выпуск. редактор, канд. филос. наук (Россия)
Глазырин А.С., выпуск. редактор, д-р техн. наук (Россия)
Алексеев С.В., д-р физ.-мат. наук (Россия)
Борисов А.М., д-р физ.-мат. наук (Россия)
Воропай Н.И., д-р техн. наук (Россия)
Джин-Чун Ким, Dsc (Южная Корея)
Заворин А.С., д-р техн. наук (Россия)
Зиатдинов Р.А., канд. физ.-мат. наук (Южная Корея)
Ильин А.П., д-р физ.-мат. наук (Россия)
Конторович А.Э., д-р геол.-минерал. наук (Россия)
Коротеев Ю.М., д-р физ.-мат. наук (Россия)
Коршунов А.В., д-р хим. наук (Россия)
Кочегуров А.И., канд. техн. наук (Россия)
Маркович Д.М., д-р физ.-мат. наук (Россия)
Муравьев С.В., д-р техн. наук (Россия)
Никитенков Н.Н., д-р физ.-мат. наук (Россия)
Оствальд Р.В., канд. хим. наук (Россия)
Пестряков А.Н., д-р хим. наук (Россия)
Покровский О.С., канд. геол.-минерал. наук (Франция)
Руи Д., PhD (Португалия)
Савичев О.Г., д-р геогр. наук (Россия)
Силкин В.М., д-р физ.-мат. наук (Испания)
Спицын В.Г., д-р техн. наук (Россия)
Старостенко В.И., д-р физ.-мат. наук (Украина)
Тойпель У., Dsc (Германия)
Уленев О.Н., д-р физ.-мат. наук (Россия)
Ханьялич К., Dsc (Нидерланды)
Пойлов В.З., д-р техн. наук (Россия)
Боярко Г.Ю., д-р экон. наук, канд. г.-м. наук, проф. (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)
Белозеров В.Б., д-р геол.-минерал. 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)
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, 2021

УВАЖАЕМЫЕ ЧИТАТЕЛИ!

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

Учредителем является Томский политехнический университет.

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (свидетельство ПИ № ФС 77-65008 от 04.03.2016 г.)

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

Пятилетний импакт-фактор РИНЦ за 2015 г. – 0,339
(без самоцитирования – 0,287)

«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 георесурсов, 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
- Экономические и социальные аспекты использования георесурсов

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 332, № 8, 2021

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

Editorial Board

Semiletov I.P., editor in chief, Dr. Sc. (Russia)
Kiryanova L.G., managing editor, Cand. Sc. (Russia)
Glazyrin A.S., managing editor, Dr. Sc. (Russia)
Alekseenko S.V., Dr. Sc. (Russia)
Borisov A.M., Dr. Sc. (Russia)
Voropai N.I., Dr. Sc. (Russia)
Jin-Chun Kim, Dsc (South Korea)
Zavorin A.S., Dr. Sc. (Russia)
Ziatdinov R.A., Cand. Sc. (South Korea)
Ilyin A.P., Dr. Sc. (Russia)
Kontorovich A.E., Dr. Sc. (Russia)
Koroteev Yu.M., Dr. Sc. (Russia)
Korshunov A.V., Dr. Sc. (Russia)
Kochegurov A.I., Cand. Sc. (Russia)
Markovich D.M., Dr. Sc. (Russia)
Muravyov S.V., Dr. Sc. (Russia)
Nikitenkov N.N., Dr. Sc. (Russia)
Ostvald R.V., Cand. Sc. (Russia)
Pestryakov A.N., Dr. Sc. (Russia)
Pokrovsky O.S., Cand. Sc. (France)
Rui D., PhD (Portugal)
Savichev O.G., Dr. Sc. (Russia)
Silkin V.M., PhD (Spain)
Spitsyn V.G., Dr. Sc. (Russia)
Starostenko V.I., Dr. Sc. (Ukraine)
Teipel U., Dsc (Germany)
Ulenekov O.N., Dr. Sc. (Russia)
Hanjalic K., Dsc (Netherlands)
Poilov V.Z., Dr. Sc. (Russia)
Sofronov V.L., Dr. Sc. (Russia)
Buznik V.M., Dr. Sc. (Russia)
Zakharov Yu.A., Dr. Sc. (Russia)
Boyarko G.Yu., Dr. Sc., Cand. 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)
Belozherov V.B., 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)
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 Federal Service for Supervision in the Sphere of Communications, Information Technology and Mass Media).

ISSN (print) – 2500-1019

ISSN (on-line) – 2413-1830

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

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

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

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

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

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

The publication of manuscripts is free of charge.

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

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENTS

- Геохимические особенности природных вод бассейна реки Витим (западные районы Патомского нагорья)**
Новиков Д.А., Максимова А.А., Напреев Д.В., Копылова Ю.Г., Хващевская А.А. 7
Geochemical features of natural waters in the basin of the Vitim river (western regions of Patom upland)
Novikov D.A., Maksimova A.A., Napreev D.V., Kopylova Yu.G., Khvacshvskaya A.A.
- Получение окислительной смеси $N_xO_y-O_2-CO_2-H_2O$ (пар) для термохимической обработки облученного топлива на основе диоксида урана**
Аксютин П.В., Дьяченко А.С., Жабин А.Ю., Жерин И.И. 18
Production of $N_xO_y-O_2-CO_2-H_2O$ (steam) for thermochemical treatment of irradiated UO_2 fuel
Aksyutin P.V., Dyachenko A.S., Zhabin A.Yu., Zherin I.I.
- Контроль ресурса PDC-пластин бурового долота**
Третьяк А.Я., Сидорова Е.В., Литкевич Ю.Ф., Лубянова С.И., Бурцев А.А., Мохов А.В. 28
Drilling bit PDC plates lifetime control
Tretyak A.Ya., Sidorova E.V., Litkevich Yu.F., Lubianova S.I., Burtsev A.A., Mokhov A.V.
- Уравновешенность установок скважинных штанговых насосов на основе анализа ваттметрограмм**
Яшин А.Н., Хакимьянов М.И. 36
Balance of sucker rod pump units based on analysis of wattmetrograms
Yashin A.N., Khakimyanov M.I.
- Деградация ферроцианида калия, используемого в качестве антислеживателя**
Пойлов В.З., Кузьминых К.Г., Титков С.Н., Алиферова С.Н. 45
Degradation of potassium ferrocyanide used as an anti-caking agent
Poilov V.Z., Kuzminykh K.G., Titkov S.N., Aliferova S.N.
- Математическое моделирование и методы исследования гидродинамической очистки горизонтальных скважин**
Харламов С.Н., Мехран Д., Филиппов К.А. 53
Mathematical modeling and research methods of horizontal wells hydrodynamic cleaning
Kharlamov S.N., Mehran J., Filippov K.A.
- О возможности использования глиносодержащих барьерных материалов для локализации последствий радиационных аварий (на примере АЭС «Фукусима-Дайити»)**
Антоненко М.В., Беспала Е.В., Мышкин В.Ф., Павлюк А.О., Котляревский С.Г., Захарова Е.В., Волкова А.Г., Беспала Ю.Р. 74
Possibility of using clay-based barrier materials for localizing the consequences of radiations accidents (for example, the Fukushima Daiichi NPP)
Antonenko M.V., Bospala E.V., Myshkin V.F., Pavlyuk A.O., Kotlyarevskiy S.G., Zakharova E.V., Volkova A.G., Bospala Yu.R.
- Сиениты и монзониты Сия-Ушпинского междуречья Горного Алтая: абсолютный возраст, геохимия и петрология**
Гусев А.И., Табакаева Е.М. 87
Syenites and monzonites in the Siya-Ushpinsky interfluve of Gorny Altai: absolute age, geochemistry and petrology
Gusev A.I., Tabakaeva E.M.
- Оценка возможности использования молочно-белого кварца Новотроицкого месторождения для получения высокочистого кварца, Южный Урал**
Корекина М.А. 99
Assessment of possibility of using milky-white quartz of Novotroitskoe deposit for obtaining high-purity quartz, South Urals
Korekina M.A.
- Возможности гидрогеохимической типизации флюидных систем**
Никитенко О.А., Ершов В.В. 109
Possibility of hydrogeochemical classification of fluid systems
Nikitenko O.A., Ershov V.V.
- Теплообмен при фильтрации жидкости в кольцевом канале, заполненном пористой средой**
Дехтярь Р.А. 126
Heat transfer during liquid filtration in an annular channel filled with porous medium
Dekhtyar R.A.
- Аналитические связи между фильтрационно-емкостными параметрами продуктивных пластов Западной Сибири на основе обобщенной математической модели капиллярных кривых**
Мухаметшин В.В., Ахметов Р.Т., Кулешова Л.С., Грезина О.А. 135
Analytical links between porosity and permeability correlations of productive strata of Western Siberia based on a generalized mathematical model of capillary curves
Mukhametshin V.V., Akhmetov R.T., Kuleshova L.S., Grezina O.A.
- Новая методика проектирования преобразующего механизма станков-качалок**
Хабибуллин М.Я. 142
Methodology of designing the transforming mechanism of pumping unit
Khabibullin M.Ya.
- Палеогеографические, литолого-геохимические особенности и битуминозность живетских отложений среднего девона Алтае-Саянской складчатой области**
Шаминова М.И., Рычкова И.В., Саар К.Н. 149
Paleogeographic, lithological-geochemical features and bituminites of Zhivetian deposits of the Middle Devonian of the Altai-Sayan folded region
Shaminova M.I., Rychkova I.V., Saar K.N.
- Применение цеолитов Якутии для получения гранулированного теплоизоляционного материала**
Иванов К.С. 160
Application of zeolites of Yakutia for obtaining granular thermal insulation material
Ivanov K.S.
- Исследование обрушений грунта над неглубокой заброшенной шахтой для определения геотехнических условий индивидуального строительства**
Усанов С.В., Усанова А.В. 168
Investigation of ground collapses over a shallow abandoned mine to determine the geotechnical conditions of individual construction
Usanov S.V., Usanova A.V.

- | | | |
|---|------------|---|
| Учет влияния верхней части разреза на результаты аудиоманнителлурических зондирований с помощью контролируемого источника в ближней зоне Давыдов В.А. | 177 | Taking into account the influence of the upper part of the section on the results of audiomagnetotelluric soundings using a controlled source in the near zone Davydov V.A. |
| Применение автономных сенсоров для автоматизации нефтегазодобычи Мамонова Т.Е., Громаков Е.И. | 187 | Autonomous sensors using for automation of oil and gas production Mamonova T.E., Gromakov E.I. |
| Статистическое обоснование выбора атрибутивных параметров при прогнозе доюрских коллекторов по данным сейсморазведки Чучалина К.Ю., Волкова А.А., Меркулов В.П. | 197 | Statistical justification of the choice of attributive parameters for forecasting pre-Jurassic reservoirs according to seismic data Chuchalina K.Yu., Volkova A.A., Merkulov V.P. |
| Комплексная оценка гидрогеологических условий формирования ресурсов минеральных вод Нижне-Кармадонского месторождения Клюев Р.В., Голик В.И., Босиков И.И. | 206 | Comprehensive assessment of hydrogeological conditions for formation of mineral water resources of the Nizhne-Karmadon deposit Klyuev R.V., Golik V.I., Bosikov I.I. |

УДК 543.3:550.4(282.256.615)

ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПРИРОДНЫХ ВОД БАСЕЙНА РЕКИ ВИТИМ (ЗАПАДНЫЕ РАЙОНЫ ПАТОМСКОГО НАГОРЬЯ)

Новиков Дмитрий Анатольевич^{1,2},
NovikovDA@ipgg.sbras.ru

Максимова Анастасия Алексеевна²,
rock.nastaya64@gmail.com

Напреев Денис Викторович³,
dv@mail.ru

Копылова Юлия Григорьевна⁴,
unpc_voda@mail.ru

Хвощевская Альбина Анатольевна⁴,
unpc_voda@mail.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.

³ ООО Научно-производственное предприятие геофизической аппаратуры «Луч»,
Россия, 630010, г. Новосибирск, ул. Геологическая, 49.

⁴ Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

Актуальность настоящего исследования связана с получением первых результатов комплексных геохимических исследований природных вод бассейна реки Витим в западных районах Патомского нагорья. Учитывая широкий спектр выявленных в изучаемом регионе месторождений полезных ископаемых (золота, железа, титана и свинца), возникает два прикладных аспекта применения выполненных исследований. Первый связан с адаптацией гидрогеохимического метода поисков рудных месторождений, а второй – с оценкой антропогенного влияния при разработке месторождений полезных ископаемых и эксплуатации горно-обогатительных предприятий на окружающую среду.

Цель: выявление геохимических особенностей вод бассейна р. Витим и оценка возможных источников поступления элементов в воды.

Методы. Полевое опробование проведено в соответствии с общепринятыми методиками. Химико-аналитические исследования выполнены методами титриметрии, ионной хроматографии и масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой. При анализе информации широко применялись методы математической статистики. Оценка степени концентрирования химических элементов в природных водах проводилась путем расчета коэффициентов концентрации (Кк) и водной миграции по А.И. Перельману (Кх₁).

Результаты. Приводятся первые данные комплексных гидрогеохимических исследований природных вод бассейна реки Витим (Патомское нагорье). По химическому составу преобладают SO₄-HCO₃ Mg-Ca, HCO₃ Mg-Ca воды с величиной общей минерализации от 10 до 298 мг/дм³. Они характеризуются pH от нейтральных до слабощелочных (6,6–8,0), окислительными условиями геохимической обстановки с Eh от +155,5 до +215,9 мВ и содержаниями O₂ раств. от 4,9 до 8,4 мг/дм³. Рассчитанные коэффициенты водной миграции химических элементов в изученных водах (средние) выстроились следующим образом в порядке убывания: очень сильная интенсивность миграции Se₂₃₆>I₃₇>Br₂₆>сильнаяSb_{4,5}>Mo_{3,9}>Sr_{3,7}>V_{1,0}>средняяZn_{0,60}>Li_{0,58}>P_{0,41}>Ba_{0,39}>As_{0,32}>Cu_{0,30}>Y_{0,28}>Sc_{0,27}>Si_{0,24}>Mn_{0,23}>Rb_{0,22}>Ni_{0,19}>Be_{0,18}>Ge_{0,16}>Co_{0,16}>Cr_{0,13}>слабая (инертная) интенсивность миграции>Fe_{0,075}>V_{0,062}>Ga_{0,049}>Al_{0,029}>Ti_{0,012}>Nb_{0,015}>Zr_{0,009}. Профиль выявил сложнопостроенное гидрогеохимическое поле, на которое основное влияние оказывают природные факторы.

Ключевые слова:

Природные воды, гидрохимия, интенсивность водной миграции элементов, бассейн р. Витим, Патомское нагорье, Сибирская платформа.

Введение

Бассейн реки Витим расположен на юге Сибирской платформы. Результаты детальных гидрохимических исследований природных вод в научной литературе отсутствуют. Исследуемая территория ограничена ее нижним течением от рабочего поселка Мама до поселка городского типа Витим (рис. 1). Район ис-

следований занимает большую площадь (около 7511 км²) и согласно принятому тектоническому районированию [1] расположен в пределах тектонических структур Байкальской складчатой области (основная часть) и Сибирской платформы. К изучаемому региону относится Витимский железорудный район. Основная минерализация связана с железистыми

кварцитами и гранитоидами чуйско-нечерского комплекса (U-Pb возраст 1860 ± 50 Ma). В окрестностях расположены два крупных месторождения полезных ископаемых (МПИ) – Холоднинское свинцово-цинковое гидротермально-осадочное и прожилково-вкрапленное золото-кварцево-сульфидное Сухой Лог [2, 3], а также множество мелких месторождений и проявлений. В этой связи возникает два прикладных аспекта применения выполненных исследований. Первый связан с адаптацией гидрогеохимического метода поисков рудных месторождений, а второй – с оценкой антропогенного влияния при разработке

МПИ и эксплуатации горно-обогатительных предприятий на окружающую среду. Последние работы по первому направлению связаны с именами Б.А. Колотова, Н.В. Гусева, Л.К. Мирошниковой, А.В. Паршина, А.Е. Будяка [4–7], а по второму – с Л.В. Глебовой, А.К. Харлашкиной, М.Ю. Ляпунова, М.В. Горюхина, Е.А. Вах [8–11]. Речные системы Сибирской платформы изучаются научными коллективами из Якутска, Москвы, Читы, Иркутска, Владивостока и др. Среди последних публикаций следует отметить следующие [12–17].

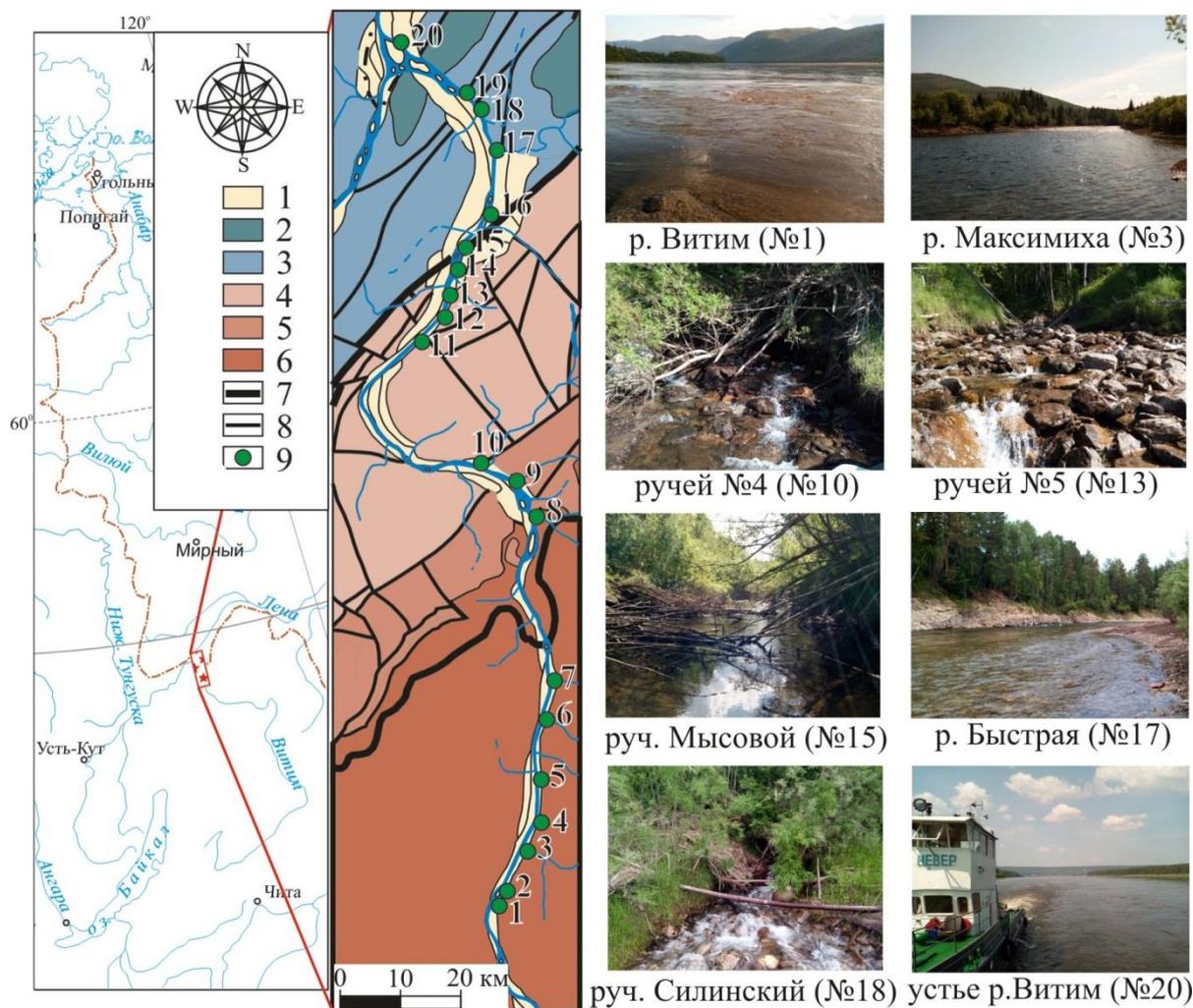


Рис. 1. Местоположение района исследования согласно государственной геологической карте Российской Федерации. Масштаб 1:1000000. Лист О 49 [20]. Отложения: 1 – четвертичные; 2 – ордовикские; 3 – кембрийские; 4 – вендские; 5 – рифейские; 6 – чуйско-нечерский гранитоидный комплекс; 7 – надвиги; 8 – разломы; 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 Язовая, 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

Fig. 1. Location of the research area according to the state geological map of the Russian Federation. Scale 1:1000000. Sheet O 49 [20]. 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. 2, 5 – creek no. 1, 6 – r. Ivanikha, 7 – r. Barshikha, 8 – r. Verkhnyaya 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 – r. Vitim outfall

Фактический материал и методика исследования

В настоящей работе представлены первые результаты комплексных геохимических исследований природных вод бассейна реки Витим. Отбор проб осуществлялся в период с 26 июня по 4 июля 2019 г. попутно с выполнением сейсморазведочных работ по реке Витим. Геофизическая партия перемещалась по реке на судах типа «Костромич», которые буксировали баржи с установленными на них бытовыми и рабочими сооружениями. Участники исследований выдвигались на моторной лодке для отбора проб в район правых притоков р. Витим, в крупные водотоки заходили в устье и с центральной части реки, пробы отбирались в соответствии с ГОСТ Р 51592-2000 «Вода. Общие требования к отбору проб». Лабораторное изучение химического состава методами титриметрии, ионной хроматографии, масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ИСП) проводилось в Проблемной научно-исследовательской лаборатории гидрогеохимии Инженерной школы природных ресурсов ТПУ (аналитики О.В. Чеботарева, Н.В. Бублий, А.С. Погуца, В.В. Куровская, К.Б. Кривцова, Л.А. Ракул).

Для выявления степени концентрирования химических элементов в природных водах были рассчитаны коэффициенты концентрации (Kk_i) и водной миграции по А.И. Перельману (Kx_i). Первый рассчитывается как: $Kk_i = \frac{m_x}{n_x}$, где m_x – содержание элемента в воде; n_x – кларк литосферы в % (по Н.А. Григорьеву [18]). Второй: $Kx_i = \frac{m_x \cdot 100}{a \cdot n_x}$, [19] где m_x – содержание элемента в воде (мг/дм^3); a – минерализация (мг/дм^3) и n_x – кларк литосферы в %.

Результаты исследования и обсуждение

Изученные природные воды бассейна р. Витим ультрапресные и умеренно пресные, преимущественно $\text{SO}_4\text{-HCO}_3$ Mg-Ca, HCO_3 Mg-Ca состава с величиной общей минерализации от 10 до 298 мг/дм^3 (табл. 1, рис. 2, а). Формулы Курлова имеют следующий вид (от 10 %-экв.):

$$\text{pH}7,4 \frac{\text{HCO}_3^- 79 \text{ SO}_4^{2-} 19 \text{ Cl}^- 2}{\text{Ca}^{2+} 73 \text{ Mg}^{2+} 27 \text{ Na}^+ 0,4 \text{ K}^+ 0,1};$$

$$\text{pH}7,4 \frac{\text{HCO}_3^- 93 \text{ SO}_4^{2-} 6 \text{ Cl}^- 1}{\text{Ca}^{2+} 64 \text{ Mg}^{2+} 36 \text{ Na}^+ 0,5 \text{ K}^+ 0,1}.$$

Геохимические параметры (рН, Eh и O_2) контролируются в первую очередь условиями залегания природных вод и характером их водообмена. Воды характеризуются рН от нейтральных до слабощелочных (6,6–8,0), окислительными условиями геохимической обстановки с Eh от +155,5 до +215,9 мВ и содержаниями $\text{O}_{2\text{раств.}}$ от 4,9 до 8,4 мг/дм^3 и кремния от 0,5 до 4,5 мг/дм^3 . Для сравнения воды реки Алдан (правый приток р. Лены), находящейся к востоку от изучаемых объектов, являются пресными $\text{SO}_4\text{-HCO}_3$ Na-Mg-Ca с величиной общей минерализации 86 мг/дм^3 , нейтральными и слабощелочными рН с содержанием кремния до 3,5 мг/дм^3 [21], а воды реки Куда, находящейся на юго-западе от изучаемой территории, имеют $\text{SO}_4\text{-HCO}_3$ Mg-Ca состав с величиной

общей минерализации от 204–776 мг/дм^3 и рН в интервале 7,3–8,3 [22]. Преобладающими ионами в водах бассейна р. Витим являются HCO_3^- , Ca и Mg, концентрации которых не превышают 200, 41 и 18 мг/дм^3 соответственно. На гидрогеохимическом профиле (водопункты 1–20), в направлении от рабочего поселка Мама до поселка городского типа Витим, происходит рост общей минерализации вод и концентраций основных солеобразующих компонентов (табл. 1, рис. 2, б, в). Гидрохимические данные позволяют выделить две группы водопунктов. Первая (№ 1–9 и 20) объединяет ультрапресные воды с величиной общей минерализации от 10 до 41 мг/дм^3 . Она характеризуется концентрациями HCO_3^- до 26, Ca до 7,5 и Mg до 1,4 мг/дм^3 и содержаниями кремния до 4,5 мг/дм^3 , и величиной перманганатной окисляемости 2,04–4,12 мг/дм^3 . Вторая (№ 10–19) включает в себя умеренно пресные воды с величиной общей минерализации от 111 до 298 мг/дм^3 . Они отличаются также более высокими содержаниями HCO_3^- до 200, Ca – до 41 и Mg – до 18 мг/дм^3 , но более низкими концентрациями кремния – до 3,5 мг/дм^3 и водорастворенной органики (перманганатная окисляемость составляет 0,84–1,64 мг/дм^3). Среди них по величине перманганатной окисляемости выделяется высокими значениями р. Дурная (№ 19), где она достигает 5,72 мг/дм^3 . В реке Быстрой (№ 17) и ручье Силинском (№ 18) отмечаются относительно высокие содержания ионов хлора и натрия, которые варьируют в диапазоне 7,2–8,8 и 0,42–0,46 мг/дм^3 соответственно.

Разделение имеющихся данных на однородные геохимические совокупности было выполнено по коэффициентам (Ca/Na, Ca/Mg, Ca/Si, Mg/Si, Na/Si, Si/Na, rNa/rCl и SO_4/Cl) и позволило выделить пять групп.

В первую (I) группу входят ультрапресные воды четырех объектов (№ 2–5) с величиной общей минерализации от 10 до 23 мг/дм^3 , рН (6,87–7,01), Eh (+172 – +212 мВ), $\text{O}_{2\text{раств.}}$ (5,2–7,3 мг/дм^3) и содержанием Si 2,3–4,5 мг/дм^3 . По отношениям Ca/Si (0,4–1,8) и Si/Na (75–79) можно предположить, что эти воды дренируют силикатные породы с высоким содержанием кремния.

Вторая (II) группа объединяет преимущественно $\text{SO}_4\text{-HCO}_3$ Mg-Ca воды объектов № 1, 6–9 и 20 с величиной общей минерализации 16–41 мг/дм^3 , рН 6,63–7,52, Eh +189 – +216 мВ, $\text{O}_{2\text{раств.}}$ 4,9–7,8 мг/дм^3 и содержанием кремния 0,5–1,9 мг/дм^3 . По составу отличаются воды р. Иванихи (№ 6), имеющие HCO_3 Ca-Mg состав. Вниз по течению р. Витим в этой группе объектов увеличивается отношение Ca/Mg от 4,8 до 10,7.

Третья (III) группа является самой представительной и включает пресные воды восьми объектов (№ 10–17). Величина общей минерализации варьирует в диапазоне 111–205 мг/дм^3 , при изменении рН от 7,06 до 7,91, Eh от +155 до +205 мВ, $\text{O}_{2\text{раств.}}$ от 6,8 до 8,4 мг/дм^3 и содержанием кремния в интервале 1,9–3,5 мг/дм^3 . Состав вод в группе меняется с HCO_3 Mg-Ca на $\text{SO}_4\text{-HCO}_3$ Mg-Ca. В корреляции с этим закономерно ведут себя основные геохимические ко-

эффиценты. Так, отношение Ca/Na снижается с 809 до 46, Na/Si растет от 0,009 до 0,160. Средние величины отношений Ca/Mg и Ca/Si равны 2,8 и 9,2 соответственно. Воды данной группы дренируют в основ-

ном карбонатные породы, что выражено в снижении содержания кремния и росте отношения Ca/Si, тогда как в первой группе наблюдается обратная картина и Ca/Si составляет 0,4–1,8.

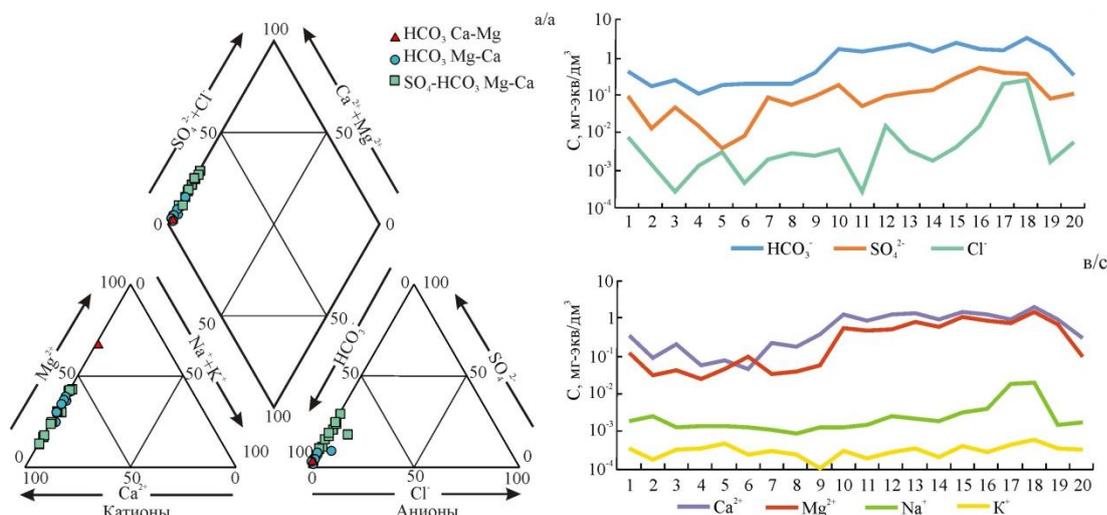


Рис. 2. Диаграмма Пайпера (а) и профиль от пос. Мама до пос. Витим (б, в) с нанесением данных по составу природных вод бассейна р. Витим

Fig. 2. Piper diagrams (a) and profile from vil. Mama to vil. Vitim (b, c) with the data on composition of natural waters in the Vitim river basin

Таблица 1. Химический состав природных вод бассейна реки Витим, мг/дм³

Table 1. Chemical composition of natural waters in the Vitim river basin, mg/l

| № на рис. 1 № in Fig. 1 | pH | Eh* | П.О.** | O ₂ | HCO ₃ ⁻ | SO ₄ ²⁻ | Cl ⁻ | Ca ²⁺ | Mg ²⁺ | Na ⁺ | K ⁺ | NH ₄ ⁺ | NO ₃ ⁻ | Si | M ^x | Химический тип Chemical type |
|----------------------------|------|-------|--------|----------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------|------------------|------------------|-----------------|----------------|------------------------------|------------------------------|------|----------------|---|
| 1 | 6,91 | 217,3 | 4,12 | 6,28 | 26 | 4,34 | 0,26 | 7,01 | 1,44 | 0,04 | 0,01 | 0,09 | 0,45 | 1,90 | 41 | SO ₄ -HCO ₃ Mg-Ca |
| 2 | 7,01 | 202,5 | 3,8 | 7,31 | 10 | 0,61 | 0,05 | 1,79 | 0,37 | 0,06 | 0,01 | 0,17 | 0,10 | 4,53 | 14 | HCO ₃ Mg-Ca |
| 3 | 6,93 | 208,4 | 2,04 | 6,90 | 15 | 2,22 | 0,01 | 4,14 | 0,51 | 0,03 | 0,01 | 0,15 | 0,10 | 2,50 | 23 | SO ₄ -HCO ₃ Mg-Ca |
| 4 | 6,87 | 190,0 | 2,6 | 6,48 | 7 | 0,71 | 0,05 | 1,14 | 0,31 | 0,03 | 0,01 | 0,15 | 0,18 | 2,27 | 10 | SO ₄ -HCO ₃ Ca-Mg |
| 5 | 6,92 | 172,2 | 3,72 | 5,17 | 11 | 0,18 | 0,11 | 1,50 | 0,54 | 0,03 | 0,02 | 0,17 | 0,12 | 2,52 | 15 | HCO ₃ Mg-Ca |
| 6 | 6,63 | 211,5 | 2,76 | 6,32 | 12 | 0,40 | 0,02 | 0,94 | 1,22 | 0,03 | 0,01 | 0,15 | 0,10 | 1,42 | 16 | HCO ₃ Ca-Mg |
| 7 | 7,52 | 185,5 | 2,92 | 4,93 | 12 | 4,04 | 0,07 | 4,44 | 0,41 | 0,03 | 0,01 | 0,15 | 0,23 | 0,56 | 22 | SO ₄ -HCO ₃ Mg-Ca |
| 8 | 7,42 | 184,4 | 2,04 | 7,87 | 12 | 2,61 | 0,10 | 3,57 | 0,48 | 0,02 | 0,01 | 0,11 | 0,10 | 1,55 | 20 | SO ₄ -HCO ₃ Mg-Ca |
| 9 | 6,93 | 210,7 | 1,16 | 7,61 | 23 | 4,33 | 0,08 | 7,54 | 0,70 | 0,03 | 0,00 | 0,09 | 0,00 | 1,79 | 37 | SO ₄ -HCO ₃ Mg-Ca |
| 10 | 7,43 | 205,6 | 1,64 | 8,44 | 100 | 9,08 | 0,13 | 24,65 | 6,63 | 0,03 | 0,01 | 0,07 | 0,13 | 3,38 | 142 | SO ₄ -HCO ₃ Mg-Ca |
| 11 | 7,83 | 176,7 | 1,16 | 7,93 | 84 | 2,46 | 0,01 | 17,47 | 5,65 | 0,04 | 0,01 | 0,05 | 0,10 | 2,80 | 111 | HCO ₃ Mg-Ca |
| 12 | 7,06 | 191,3 | 0,84 | 8,15 | 112 | 4,55 | 0,52 | 24,62 | 6,45 | 0,06 | 0,01 | 0,05 | 0,10 | 2,59 | 150 | HCO ₃ Mg-Ca |
| 13 | 7,49 | 185,5 | 1,32 | 7,81 | 132 | 5,59 | 0,12 | 28,44 | 10,12 | 0,05 | 0,01 | 0,05 | 0,10 | 1,94 | 178 | HCO ₃ Mg-Ca |
| 14 | 7,41 | 178,8 | 0,84 | 7,71 | 88 | 6,48 | 0,06 | 19,22 | 7,39 | 0,04 | 0,01 | 0,05 | 0,10 | 2,14 | 122 | HCO ₃ Mg-Ca |
| 15 | 7,72 | 170,5 | 1,48 | 6,81 | 146 | 13,64 | 0,15 | 29,74 | 13,37 | 0,07 | 0,02 | 0,06 | 0,10 | 2,31 | 205 | SO ₄ -HCO ₃ Mg-Ca |
| 16 | 7,91 | 160,0 | 1,24 | 8,36 | 98 | 25,67 | 0,55 | 24,74 | 10,88 | 0,09 | 0,01 | 0,05 | 0,13 | 2,22 | 162 | SO ₄ -HCO ₃ Mg-Ca |
| 17 | 7,86 | 154,4 | 0,84 | 6,88 | 92 | 18,51 | 7,22 | 19,21 | 8,96 | 0,42 | 0,02 | 0,05 | 0,10 | 0,50 | 156 | SO ₄ -HCO ₃ Mg-Ca |
| 18 | 8,00 | 175,7 | 0,92 | 7,15 | 200 | 17,93 | 8,79 | 41,38 | 18,05 | 0,46 | 0,02 | 0,05 | 0,48 | 1,84 | 298 | HCO ₃ Mg-Ca |
| 19 | 7,33 | 196,6 | 5,72 | 4,14 | 93 | 3,73 | 0,06 | 18,98 | 8,44 | 0,03 | 0,01 | 0,28 | 0,20 | 2,61 | 126 | HCO ₃ Mg-Ca |
| 20 | 7,20 | 200,8 | 3,64 | 6,31 | 20 | 5,12 | 0,20 | 5,86 | 1,13 | 0,04 | 0,01 | 0,15 | 0,20 | 3,56 | 34 | SO ₄ -HCO ₃ Mg-Ca |

Примечание: * – показатель Eh выражен в мВ; ** – перманганатная окисляемость – в мгО/дм³; M^x – величина общей минерализации. Наименование химических типов дано в соответствии с формулой М.Г. Курлова (от 10 %-экв.).
Note: * – Eh is expressed in mV; ** – permanganate oxidizability is expressed in mgO/dm³; M^x – the TDS value. The name of the chemical types is given in accordance with the M.G. Kurlov formula (from 10 %-eq.).

Значительно отличаются от рассмотренных выше геохимических групп (I–III) ручей Силинский (№ 18) и р. Дурная (№ 19), которые выделены в самостоятельные объекты под номерами IV и V соответственно. Так, воды руч. Силинского (IV, № 18) на гидрогеохимическом профиле характеризуются наиболее высокой минерализацией и pH, равными 298 мг/дм³ и 8,0 соответственно (табл. 1). У вод окислительные параметры

среды с величиной Eh +172 мВ, O₂ раств. 7,1 мг/дм³ и содержанием Si 2,2 мг/дм³. Отмечаются высокие отношения Ca/Si (18,6) и Na/Si (0,2). Воды р. Дурной (V, № 19) имеют величину общей минерализации 126 мг/дм³, pH 7,33, Eh +195 мВ и O₂ раств. 4,1 мг/дм³. Из рассмотренных вод они отличаются самыми низкими концентрациями кремния – до 0,5 мг/дм³, и довольно высокими отношениями Ca/Na (545,1) и Ca/Si (40,4).

В представленных объектах впервые изучено распределение широкого спектра химических элементов (от лития до урана). На них кремнию отводится первое место с концентрациями до $4,53 \text{ мг/дм}^3$ (табл. 1, рис. 3, а), отмечается следующее: воды в наибольшей степени обогащены (мг/дм^3): Fe до 0,61, Al до 0,33, Sr до 0,15, Mn до 0,06, P до 0,04 и Ba до 0,04, что является логичным, поскольку Si, Fe и Al являются основными элементами континентальной коры. Микрокомпоненты (Ti, V, Br, Zn, Li и Cr) характеризуются концентрациями в растворе от 0,002 до $0,014 \text{ мг/дм}^3$. Группа химических элементов (Rb, I, Cu, Se, Ni, V, Y, Sb, Mo, Sc, Co и As) отличается более низкими содержаниями от $1,2 \cdot 10^{-4}$ до $2,5 \cdot 10^{-3} \text{ мг/дм}^3$ и последняя (Zr, Ga, Be, Ge и Nb) соответствует концентрациям ниже $2,7 \cdot 10^{-4} \text{ мг/дм}^3$. С ростом общей минерализации в растворе накапливаются Fe, Al, Sr, P, Mn, Ba, Ti, V, Br, Li, Cu, V, As, тогда как содержания Rb и Nb снижаются. У Zn, Ni, Mo, Co, Zr, Ga, Ge и Y отмечено

уменьшение концентраций в средней части гидрогеохимического профиля (водопункты с 6 по 15).

В настоящее время в исследуемом районе разработка коренных МПИ не проводится. Поэтому основными источниками поступающих в воды химических элементов являются дренируемые ими горные породы и атмосферные выпадения, при главенствующей роли первых (табл. 2).

В наибольшей мере обогащены микрокомпонентами три изученных объекта. Так, в водах реки Витим (№ 1) выявлены повышенные содержания (до мг/дм^3): Mn (0,04), Fe (0,3), Al (0,26), Zn (0,004), Cr (0,001), Rb (0,002), Cu (0,002), Ni (0,002), Y (0,0008), As (0,0001), Zr (0,0003), Ga (0,0001) и Nb (0,00002); ручья Мысового – Fe (0,6), Al (0,3), Mn (0,06), Ti (0,01), Cu (0,001), Ni (0,0009), Y (0,001), Sc (0,0002), Co (0,0004), Ga (0,0002), Be (0,00008); реки Пыдриха – Fe (0,4), Al (0,3), Mn (0,02), Ti (0,01), Br (0,009), Cr (0,002), Cu (0,001), V (0,001), Sc (0,0002), As (0,0003), Ga (0,0002).

Таблица 2. Минералогические особенности пород – источников поступления элементов в речные воды

Table 2. Mineralogical features of rocks – sources of entry of elements into river waters

| Локализация изученных объектов Localization of the studied objects | Породы Rocks | Рудные минералы Ore minerals | Поступающие элементы Acting elements |
|---|--|--|---|
| р. Витим r. Vitim | габброиды, гранитоиды gabbroids, granitoids | магнетит (FeFe_2O_4), ильменит (FeTiO_3), молибденит (MoS_2), касситерит (SnO), циркон ($\text{Zr}[\text{SiO}_4]$), монацит ((Ce, La, Nd, Th)[PO_4]), ксенотим ($\text{Y}[\text{PO}_4]$) magnetit (FeFe_2O_4), ilmenite (FeTiO_3), molybdenite (MoS_2), cassiterite (SnO), zircon ($\text{Zr}[\text{SiO}_4]$), monazite ((Ce, La, Nd, Th)[PO_4]), xenotime ($\text{Y}[\text{PO}_4]$) | Fe, Ti, V, Zn, Mo, Sn, Ag, Pb, Be, Li, Zr, Y, Yb, REE, Nb |
| р. Максимиha r. Maksimikha | Fe-кварцитогайсы, Fe-кварцитосланцы Fe-quartzite gneiss, Fe-quartzite shists | гематит (Fe_2O_3), магнетит (FeFe_2O_4), сфалерит (ZnS), касситерит (SnO_2) hematite (Fe_2O_3), magnetit (FeFe_2O_4), sphalerite (ZnS), cassiterite (SnO) | Fe, Zn, Sn |
| р. Барчиха r. Barchikha | Fe-кварциты, сланцы, гранитоиды, кварцевые жилы, грейзенизированные гранитоиды, грейзенизированные плагиопегматиты, конгломераты, гравелиты Fe-quartzites, shists, quartz vena, greisenized granitoids, plagiopegmatitis, conglomerates | гематит (Fe_2O_3), магнетит (FeFe_2O_4), псиломелан (MnO), молибденит (MoS_2), вольфрамит ((Fe,Mn) WO_4), берилл ($\text{Al}_2[\text{Be}_3(\text{Si}_6\text{O}_{18})] \cdot (\text{H}_2\text{O})_{<1,5}$), танталит-колумбит ((Fe, Mn) $\text{Ta}_2\text{O}_6 - (\text{Fe, Mn})\text{Nb}_2\text{O}_6$), эвксенит ((Y, Ca)(Ti,Nb) $_2\text{O}_6$), фергуссонит (YNbO_4), монацит ((Ce, La, Nd, Th)[PO_4]), ксенотим ($\text{Y}[\text{PO}_4]$), ураноторит ($\text{ThU}[\text{SiO}_4]$), циркон ($\text{Zr}[\text{SiO}_4]$) hematite (Fe_2O_3), magnetit (FeFe_2O_4), psilomelan (MnO), molybdenite (MoS_2), wolframite ((Fe,Mn) WO_4), beryl ($\text{Al}_2[\text{Be}_3(\text{Si}_6\text{O}_{18})] \cdot (\text{H}_2\text{O})_{<1,5}$), tantalite columbite ((Fe, Mn) $\text{Ta}_2\text{O}_6 - (\text{Fe, Mn})\text{Nb}_2\text{O}_6$), euxenit ((Y, Ca)(Ti,Nb) $_2\text{O}_6$), fergusonite (YNbO_4), monazite ((Ce, La, Nd, Th)[PO_4]), xenotime ($\text{Y}[\text{PO}_4]$), uranotorite ($\text{ThU}[\text{SiO}_4]$), zircon ($\text{Zr}[\text{SiO}_4]$) | Fe, Mn, Al, Mo, W, Be, Ta, Nb, Y, Ce, La, Th, U, Au |
| р. Верх-Язовая r. Verkh-Yazovaya | Fe-кварциты, конгломераты, гравелиты, терригенные отложения, кварцевые жилы Fe-quartzites, conglomerates, gravelites, terrigenous deposits, quartz vena | гематит (Fe_2O_3), магнетит (FeFe_2O_4), циркон ($\text{Zr}[\text{SiO}_4]$), рутил (TiO_2), ильменит (FeTiO_3), вольфрамит ((Fe,Mn) WO_4) hematite (Fe_2O_3), magnetit (FeFe_2O_4), zircon ($\text{Zr}[\text{SiO}_4]$), rutile (TiO_2), ilmenite (FeTiO_3), wolframite ((Fe,Mn) WO_4) | Fe, Mn, W, Y, Yb, Au |
| р. Дурная r. Durnaya | россыпи золота placers of gold | | Au |

Среди геологических факторов литолого-минералогические особенности водовмещающих пород выступают основными при протекании процессов формирования химического состава природных вод. Для оценки степени накопления в водах химических элементов были рассчитаны коэффициенты концентрации, которые выявили следующий ряд (рис. 3, б): Se ($9 \cdot 10^{-3}$) > Sb ($3 \cdot 10^{-3}$) > I ($1 \cdot 10^{-3}$) > Br ($1 \cdot 10^{-3}$) > B ($2 \cdot 10^{-4}$) > Sr ($2 \cdot 10^{-4}$) > Mo ($2 \cdot 10^{-4}$) > As ($5 \cdot 10^{-5}$) > Li ($3 \cdot 10^{-5}$) > Ba ($2 \cdot 10^{-5}$) > Zn ($2 \cdot 10^{-5}$) > Sc ($1 \cdot 10^{-5}$) > P ($1 \cdot 10^{-5}$) > Mn ($1 \cdot 10^{-5}$) > Cu ($1 \cdot 10^{-5}$) > Co

($1 \cdot 10^{-5}$) > Y ($1 \cdot 10^{-5}$) > Ni ($8 \cdot 10^{-6}$) > Ge ($8 \cdot 10^{-6}$) > Si ($7 \cdot 10^{-6}$) > Cr ($6 \cdot 10^{-6}$) > Rb ($4 \cdot 10^{-6}$) > Be ($3 \cdot 10^{-6}$) > V ($3 \cdot 10^{-6}$) > Fe ($3 \cdot 10^{-6}$) > Ga ($3 \cdot 10^{-6}$) > Al ($1 \cdot 10^{-6}$) > Ti ($6 \cdot 10^{-7}$) > Zr ($4 \cdot 10^{-7}$) > Nb ($3 \cdot 10^{-7}$). Учитывая крайне малое время взаимодействия в системе вода – горная порода, в водах не наблюдается значимых величин концентрирования элементов. Максимальные значения Kki установлены у Se, Sb, I и Br ($n \cdot 10^{-3}$); средние у As, Li, Ba, Zn, Sc, P, Mn, Cu, Co, Y ($n \cdot 10^{-5}$), а минимальные у Ti, Zr, Nb ($n \cdot 10^{-7}$).

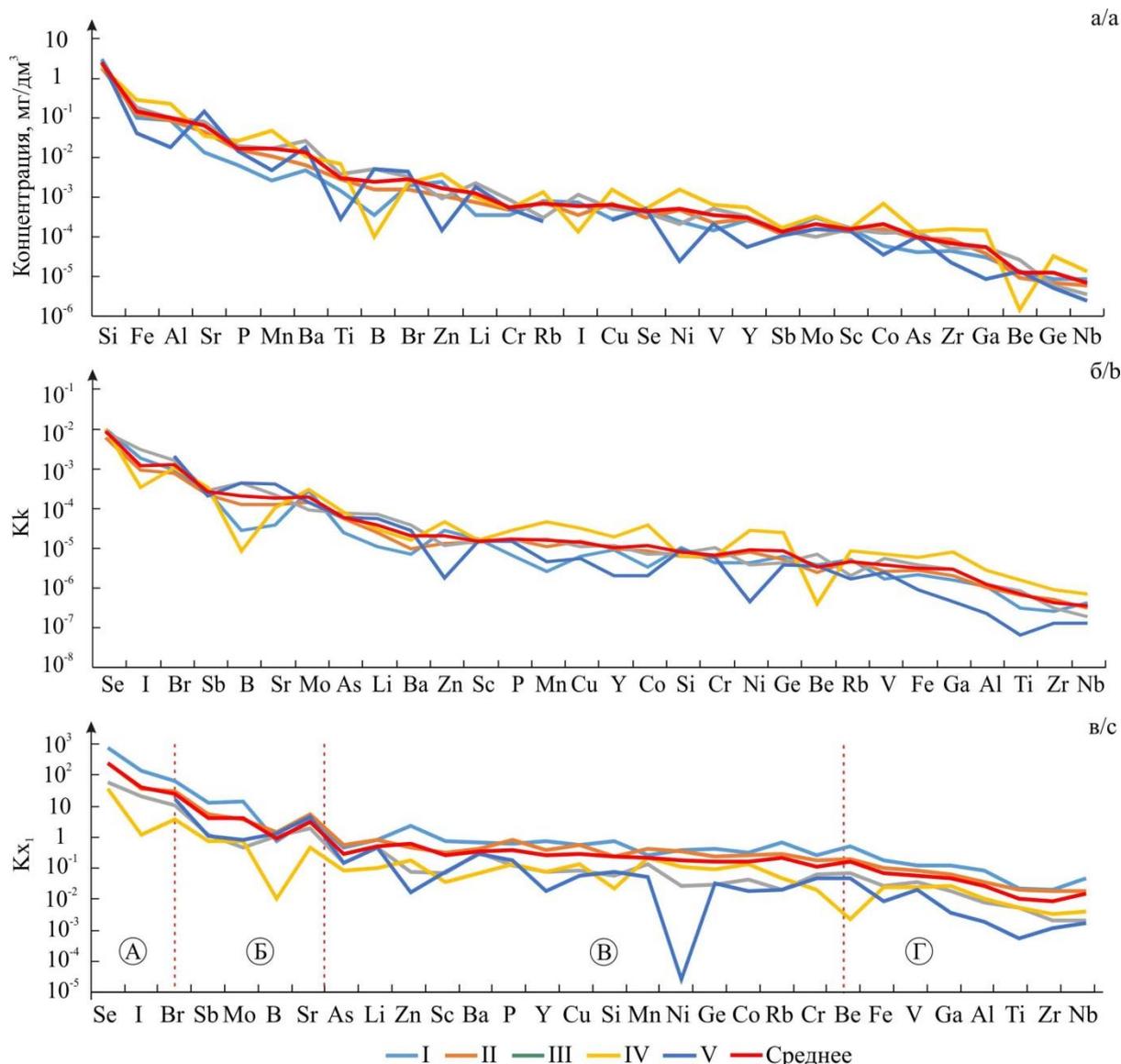


Рис. 3. Спектр распределения микрокомпонентов в водах бассейна р. Витим (а), распределение коэффициентов концентраций (б), ряды миграции микрокомпонентов в природных водах (в). Описание геохимических групп природных вод дано в тексте. Ряды миграции микрокомпонентов в природных водах (по А.И. Перельману [23]): А – высокоподвижные элементы; Б – легкоподвижные; В – подвижные; Г – инертные

Рис. 3. Distribution spectrum of trace elements in the waters in the Vitim river basin (а), distribution of concentration factors (b), microelements migration series in natural waters (c). Description of the geochemical groups of natural waters is given in the text. Microelements migration series in natural waters (according to A.I. Perelman [23]): А – highly mobile elements; В – easy mobile; С – mobile; D – inert

А.И. Перельманом [23] был предложен метод оценки водной миграции химических элементов в зоне гипергенеза по коэффициенту (K_{x_1}), который определяется как отношение содержания химического элемента в минеральном остатке воды к его содержанию в водовмещающих породах или кларку литосферы. Этот коэффициент отражает интенсивность водной миграции, определяемую свойствами самого элемента, а также степень его концентрирования или рассеяния в природных водах. Для расчетов были использованы кларки литосферы [18]. Так, усредненные значения коэффициентов водной миграции химических элементов в изученных водах (рис. 3, в) выстроились следующим образом: очень сильная интенсивность $Se_{236} > I_{37} > Br_{26} >$

сильная $Sb_{4,5} > Mo_{3,9} > Sr_{3,7} > B_{1,0} >$ средняя $Zn_{0,60} > Li_{0,58} > P_{0,41} > Ba_{0,39} > As_{0,32} > Cu_{0,30} > Y_{0,28} > Sc_{0,27} > Si_{0,24} > Mn_{0,23} > Rb_{0,22} > Ni_{0,19} > Be_{0,18} > Ge_{0,16} > Co_{0,16} > Cr_{0,13} >$ слабая (инертная) $Fe_{0,075} > V_{0,062} > Ga_{0,049} > Al_{0,029} > Ti_{0,012} > Nb_{0,015} > Zr_{0,009}$.

В сравнении с предложенными А.И. Перельманом рядами миграции в изученных водах селен переходит в группу высокоподвижных из группы легкоподвижных. Рост концентраций селена по гидрогеохимическому профилю от $9,9 \cdot 10^{-5}$ до $3,9 \cdot 10^{-4}$ мг/дм³ может быть связан с его поступлением из вмещающих пород с сульфидной минерализацией в форме гидроселенид-иона ($HSeO_3^-$) и оксида селена (SeO_3^{2-}) [24–35], что согласуется с принятыми при анализе геохимических данных Eh-pH диаграммами [36–38].

Заключение

Резюмируя вышесказанное, отметим, что изученные воды бассейна реки Витим ультрапресные и умеренно пресные, преимущественно $\text{SO}_4\text{-HCO}_3$ Mg-Ca, HCO_3 Mg-Ca состава с величиной общей минерализации от 10 до 298 мг/дм³. Воды характеризуются pH от нейтральных до слабощелочных и Eh, отвечающим окислительным условиям геохимической обстановки.

В водах бассейна р. Витим преобладают: HCO_3^- , Ca и Mg, концентрации которых не превышают 200, 41 и 18 мг/дм³ соответственно. По составу и величине общей минерализации выделяются две группы. Первая (№ 1–9 и 20) включает ультрапресные воды с величиной общей минерализации от 10 до 41 мг/дм³, с концентрациями HCO_3^- от 6,7 до 26, Ca от 1,1 до 7,5 и Mg от 0,3 до 1,4 мг/дм³, содержаниями кремния и органического вещества, достигающими 4,5 и 4,12 мг/дм³ соответственно. Вторая (№ 10–19) объединяет умеренно пресные воды с величиной общей минерализации от 111 до 298 мг/дм³, с концентрациями HCO_3^- от 84 до 200, Ca от 17 до 41 и Mg от 6 до 18 мг/дм³, содержаниями Si и органического вещества, составляющими 3,5 и 1,6 мг/дм³ соответственно.

Анализ геохимических коэффициентов (Ca/Na, Ca/Mg, Ca/Si, Mg/Si, Na/Si, Si/Na, rNa/rCl и SO_4/Cl) позволил выделить пять групп. Первая (I) группа характеризуется отношениями Ca/Si (0,4–1,8) и Si/Na (75–79), что указывает на дренирование водами силикатных пород с высоким содержанием кремния. Во второй (II) группе увеличивается отношение Ca/Mg от 4,8 до 10,7. В третьей (III) группе средние отношения Ca/Mg и Ca/Si равны 2,8 и 9,2 соответственно, а также возрастает Ca/Si отношение (0,4–1,8). В водах руч. Силинского (IV, № 18) отмечаются высокие отношения Ca/Si (18,6) и Na/Si (0,2). А воды р. Дурной

(V, № 19), протекающие в области развития преимущественно карбонатных пород, отличаются ростом отношений Ca/Na до 545,1 и Ca/Si до 40,4.

По содержаниям микрокомпонентов выделяются несколько водных объектов: р. Витим (№ 1), руч. Мысовой, р. Пыдриха, где выявлены повышенные содержания Mn (до 0,1 мг/дм³), Fe (до 0,6 мг/дм³), Al (до 0,3 мг/дм³), Cr (до 0,001 мг/дм³), Cu (до 0,001 мг/дм³), Sc (до 0,0003 мг/дм³), Ga (до 0,0002 мг/дм³), Be (до 0,00008 мг/дм³). Это свидетельствует о дополнительном наличии этих элементов в дренируемых горных породах.

Учитывая крайне малое время взаимодействия в системе вода – горная порода в водах не наблюдается значимых величин концентрирования элементов. А коэффициенты водной миграции по А.И. Перельману, отражающие интенсивность миграции элементов, показали, что очень сильную интенсивность имеют Se, I и Br, сильную – Sb, Mo, Sr и B, среднюю – Zn, Li, P, Ba, As, Cu, Y, Sc, Si, Mn, Rb, Ni, Be, Ge, Co, Cr, слабую (инертную) – Fe, V, Ga, Al, Ti, Nb, Zr, 0,009. Отмечается переход селена из группы легкоподвижных элементов (по А.И. Перельману) в группу высокоподвижных. Рост концентраций селена по гидрогеохимическому профилю от $9,9 \cdot 10^{-5}$ до $3,9 \cdot 10^{-4}$ мг/дм³ может быть связан с его поступлением из вмещающих пород с сульфидной минерализацией в форме гидроселенид-иона (HSeO_3^-) и оксида селена (SeO_3^{2-}), что требует дополнительных исследований.

Исследования проводились при финансовой поддержке проекта ФНИ № 0331-2019-0025 «Геохимия, генезис и механизмы формирования состава подземных вод арктических районов осадочных бассейнов Сибири», Российского фонда фундаментальных исследований в рамках научного проекта № 18-05-70074 «Ресурсы Арктики» и Государственного Задания РФ «Наука» в рамках проекта № FSWW-0022-2020.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хаин В.Е. Тектоника континентов и океанов (год 2000). – М.: Научный мир, 2001. – 606 с.
2. Иванов А.И. Рифейско-палеозойское рудообразование в Байкало-Патомской золоторудной провинции // Разведка и охрана недр. – 2009. – № 12. – С. 3–10.
3. Архангельская В.В. Месторождения полезных ископаемых Патомского нагорья и их структурное положение // Разведка и охрана недр. – 2012. – № 4. – С. 6–10.
4. Колотов Б.А. Научные основы гидрогеохимического метода при поисках рудных месторождений // Разведка и охрана недр. – 2008. – № 4–5. – С. 46–50.
5. Гусева Н.В., Копылова Ю.Г., Шварцев С.Л. Гидрогеохимические поиски золотого оруденения на междуречье Ензорьяха и Юнъяха (восточный склон Полярного Урала) // Разведка и охрана недр. – 2010. – № 11. – С. 54–58.
6. Мирошникова Л.В. Гидрогеохимические признаки и критерии сульфидного оруденения // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2011. – № 3 (50). – С. 12–17.
7. Комплекс методов поисков золото-урановых рудопроявлений в условиях криолитозоны района Байкало-Амурской магистрали / А.В. Паршин, А.Е. Будяк, А.В. Блинов, А.Н. Костерев // Металлогения древних и современных океанов. – 2015. – № 21. – С. 177–181.
8. Глебова Л.В., Харлашкина А.К. Гидрохимический контроль как инструмент снижения негативного воздействия на окружающую среду при добыче углеводородного сырья // Геология, география и глобальная энергия. – 2015. – № 1 (56). – С. 165–170.
9. Ляпунов М.Ю. Эколого-геохимическая характеристика поверхностных вод золоторудного месторождения «Пионер» Амурской области // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2015. – Т. 326. – № 7. – С. 44–50.
10. Горюхин М.В. Направления потенциального использования отработанных не обводненных карьеров полезных ископаемых Еврейской автономной области // Региональные проблемы: Материалы VII Всероссийской научной конференции / под ред. Е.Я. Фрисмана. – Биробиджан: Институт комплексного анализа региональных проблем Дальневосточного отделения РАН, 2018. – Т. 21. – № 3. – С. 49–54.
11. Анализ экологического состояния бухты Золотой рог залива Петра Великого / А.С. Зубцова, В.И. Петухов, Е.А. Вах, И.Л. Зубцова // Процессы в геосредах. – 2018. – № 3 (17). – С. 96–97.
12. Замана Л.В., Усманов М.Т., Борзенко С.В. Гидрохимия рек по трассе проектируемого нефтепровода «Восточная Сибирь – Тихий океан» в междуречье Витима–Олекмы // Водные ресурсы. – 2007. – Т. 34. – № 3. – С. 345–355.
13. Составляющие гидрохимического режима вод р. Лены / М.И. Кузьмин, Е.Н. Тарасова, В.А. Бычинский, Е.Б. Карабанов, А.А. Мамонтов, Е.А. Мамонтова // Водные ресурсы. – 2009. – Т. 36. – № 4. – С. 440–451.
14. Особенности кислородного режима рек в бассейнах Волги, Оби и Лены / А.В. Гончаров, В.А. Исаев, Е.Е. Лобченко, И.П. Ничипорова // Водные ресурсы. – 2011. – Т. 38. – № 5. – С. 564–570.
15. Ксенюфопова М.И., Легостаева Я.Б. Эколого-гидрохимическая характеристика рек юго-западной Якутии // Вестник Северо-

- Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова. Серия: Науки о Земле. – 2016. – № 3 (3). – С. 58–68.
16. Георгиади А.Г., Тананаев Н.И., Духова Л.А. Гидрохимический режим реки Лены в августе 2018 г. // *Океанология*. – 2019. – Т. 59. – № 5. – С. 881–884.
 17. Первые изотопно-гидрогеохимические данные по природным водам юго-восточного склона кряжа Чекановского (Арктические районы Сибирской платформы) / Д.А. Новиков, А.А. Максимова, А.Н. Пырьев, П.А. Ян // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2020. – Т. 331. – № 11. – С. 157–167.
 18. Григорьев Н.А. Распределение химических элементов в верхней части континентальной коры. – Екатеринбург: УрО РАН, 2009. – 383 с.
 19. Сванидзе И.Г., Кремлева Т.А., Соромотин А.В. Воздействие подземных вод Западно-Сибирского артезианского бассейна на миграцию макро- и микроэлементов малых рек // *Вестник ТюмГУ. Экология*. – 2012. – № 12. – С. 55–63.
 20. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1000000. Лист О 49. – СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2012.
 21. Габышев В.А., Ремигайло П.А., Габышева О.И. Пространственная структура и среда обитания фитопланктона реки Алдан // *Известия Иркутского государственного университета. Серия: биология. Экология*. – 2012. – № 2. – Т. 5. – С. 61–69.
 22. Загорюлько Н.А. Особенности основного ионного состава поверхностных вод бассейна р. Куда // *Вестник ИрГТУ*. – 2014. – № 2 (85). – С. 61–67.
 23. Перельман А.И. Геохимия ландшафта. 2-е изд. – М.: Высшая школа, 1975. – 342 с.
 24. К вопросу о формах нахождения йода и селена в природных водах и их концентрирование на ландшафтно-геохимических барьерах / Е.М. Коробова, Б.Н. Рыженко, Е.В. Черкасова, Э.М. Седых, Н.В. Корсакова, В.Н. Данилова, С.Д. Хушвахтова, В.Ю. Березкин // *Геохимия*. – 2014. – № 6. – С. 554–568.
 25. Trace metal geochemistry of remote rivers in the Canadian Arctic Archipelago / M. Colombo, K.A. Brown, J.D. Vera, B.A. Bergquist, K.J. Orians // *Chemical Geology*. – 2019. – V. 525. – P. 479–491.
 26. Natural and anthropogenic factors affecting geochemistry of the Jialing and Yangtze Rivers in urban Chongqing, SW China / T. Qin, P. Yang, C. Groves, F. Chen, G. Xie, Z. Zhan // *Applied Geochemistry*. – 2018. – V. 98. – P. 448–458.
 27. A hydrochemistry and multi-isotopic study of groundwater origin and hydrochemical evolution in the middle reaches of the Kuye River basin / C. Fu, X. Li, J. Ma, L. Liu, M. Gao, Z. Bai // *Applied Geochemistry*. – 2018. – № 98. – P. 82–93.
 28. Spatiotemporal variations of hydrogeochemistry and its controlling factors in the Gandaki River Basin, Central Himalaya Nepal / R.R. Pant, F. Zhang, F.U. Rehman, G. Wang, M. Ye, C. Zeng, H. Tang // *Science of the Total Environment*. – 2018. – V. 622–623. – P. 770–782.
 29. Seasonal change of geochemical sources and processes in the Yenisei River: a Sr, Mg and Li isotope study / R.S. Hindshaw, R. Teisserenc, T.L. Dantec, N. Tananaev // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 2019. – V. 255. – P. 222–236.
 30. The use of major, trace elements and uranium isotopic ratio ($^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$) for tracing of hydrogeochemical evolution of surface waters in the Andarax River catchment (SE Spain) / F. Navarro-Martínez, F. Sánchez-Martos, A.S. García, J.G. Gallego // *Journal of Geochemical Exploration*. – 2020. – V. 213. – 106533.
 31. Pollution, sources and environmental risk assessment of heavy metals in the surface AMD water, sediments and surface soils around unexploited Rona Cu deposit, Tibet, China / D. Qiao, G. Wang, X. Li, S. Wang, Y. Zhao // *Chemosphere*. – 2020. – V. 248. – 125988.
 32. Geochemical controls on magnesium and its speciation in various types of geothermal waters from typical felsic-rock-hosted hydrothermal systems in China / Q. Guo, M. Liu, L. Luo, K. Yan, W. Guo, G. Wu, W. Yan, Y. Wang // *Geothermics*. – 2019. – V. 81. – P. 185–197.
 33. Farhat S., Bali M., Kamel F. Geochemical and statistical studies of Mio-Pliocene aquifer's mineralization in Jerba Island, South-eastern Tunisia // *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*. – 2019. – V. 111. – P. 35–52.
 34. Ashayeri N.Y., Keshavarzi B. Geochemical characteristics, partitioning, quantitative source apportionment, and ecological and health risk of heavy metals in sediments and water: a case study in Shadegan Wetland, Iran // *Marine Pollution Bulletin*. – 2019. – V. 149. – 110495.
 35. Крайнов С.Р., Рыженка Б.Н., Швец В.М. Геохимия подземных вод. – М.: Наука, 2004. – 677 с.
 36. Brookins D.G. Eh-pH diagrams for geochemistry. – Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 1988. – 184 p.
 37. Howard III J. H. Geochemistry of selenium: formation of ferroselite and selenium behavior in the vicinity of oxidizing sulfide and uranium deposits // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 1977. – V. 41. – P. 1665–1678.
 38. Atlas of Eh-pH diagrams. Intercomparison of thermodynamic databases National Institute of Advanced Industrial Science and Technology Research Center for Deep Geological Environments Naoto Takeno. – Japan, 2005. – № 419. – 287 с.

Поступила 09.06.2021 г.

Информация об авторах

Новиков Д.А., кандидат геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией гидрогеологии осадочных бассейнов Сибири Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН; доцент кафедры геологии месторождений нефти и газа и кафедры общей и региональной геологии Новосибирского национального исследовательского государственного университета.

Максимова А.А., студент Новосибирского национального исследовательского университета.

Напреев Д.В., директор производственной геофизической экспедиции ООО Научно-производственного предприятия геофизической аппаратуры «Луч».

Копылова Ю.Г., кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник проблемной научно-исследовательской лаборатории гидрогеохимии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Хващевская А.А., кандидат геолого-минералогических наук, доцент, заведующая проблемной научно-исследовательской лабораторией гидрогеохимии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета, доцент отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDK 543.3:550.4(282.256.615)

GEOCHEMICAL FEATURES OF NATURAL WATERS IN THE BASIN OF THE VITIM RIVER (WESTERN REGIONS OF PATOM UPLAND)

Dmitry A. Novikov^{1,2},
NovikovDA@ipgg.sbras.ru

Anastasia A. Maksimova¹,
rock.nastaya64@gmail.com

Denis V. Napreev³,
ndv@mail.ru

Yulia G. Kopylova⁴,
unpc_voda@mail.ru

Albina A. Khvacshevskaya⁴,
unpc_voda@mail.ru

¹ Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of SB of RAS,
3/6, Koptyug avenue, Novosibirsk, 630090, Russia.

² Novosibirsk State University,
1, Pirogov street, Novosibirsk, 630090, Russia.

³ Scientific production enterprise of geophysical equipment «Looch»,
49, Geologicheskaya street, Novosibirsk, 630010, Russia.

⁴ National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

The relevance of this study is related to obtaining the first results of comprehensive geochemical studies of natural waters of the Vitim river basin in the western regions of the Patom upland. Taking into account a large number of mineral deposits (gold, iron, titanium, and lead), two applied aspects of using the studies performed arise. The first is related to the adaptation of the hydrogeochemical method of prospecting ore deposits. The second is related to the assessment of the anthropogenic impact of the development of mineral deposits and the operation of mining and processing enterprises on the environment.

The aim of the research is to identify the geochemical characteristics of the waters of the Vitim river basin and assess the possible sources of elements in the water.

Methods. Field testing was carried out in accordance with generally accepted methods. Chemical analytical studies were performed by titrimetry, ion chromatography and inductively coupled plasma mass spectrometry. The degree of concentration of chemical elements in natural waters was assessed by calculating the concentration coefficients (K_{Ki}) and water migration according to A.I. Perelman (K_{x1}).

Results. The paper introduces the first results of integrated hydrogeochemical studies of natural waters in the basin of the Vitim river (Patom upland). With respect to chemical composition, SO₄-HCO₃ Mg-Ca and HCO₃ Mg-Ca waters with total mineralization from 10 to 298 mg/dm³ dominate. The waters are characterized by pH from neutral to weakly alkaline (6,6–8) and the oxidation conditions of geochemical setting with Eh from +155,5 to +215,9 mV and O₂ sol content from 4,9 to 8,4 mg/dm³. The calculated water migration coefficients (average values) for chemical elements in the studied waters were ranged in a decreasing sequence as follows: very strong migration intensity Se_{23,6}>I₃₇>Br₂₆>strongSb_{4,5}>Mo_{3,9}>Sr_{3,7}>B_{1,0}>mediumZn_{0,60}>Li_{0,58}>P_{0,41}>Ba_{0,39}>As_{0,32}>Cu_{0,30}>Y_{0,28}>Sc_{0,27}>Si_{0,24}>Mn_{0,23}>Rb_{0,22}>Ni_{0,19}>Be_{0,18}>Ge_{0,16}>Co_{0,16}>Cr_{0,13}>weak (inert) migration intensity>Fe_{0,075}>V_{0,06}>Ga_{0,049}>Al_{0,029}>Ti_{0,01}>Nb_{0,015}>Zr_{0,009}. The profile revealed a complicated hydrogeochemical field which is affected mainly by natural factors.

Key words:

Natural waters, hydrochemistry, intensity of water migration of elements, river Vitim basin, Patom upland, Siberian platform.

The research was financially supported by the FSR no. 0331-2019-0025, the Russian Foundation for Basic Research as part of the scientific project no. 18-05-70074 «Arctic Resources» and State Assignment of the Russian Federation «Science» within the project no. FSWW-0022-2020.

REFERENCES

1. Khain V.E. *Tektonika kontinentov i okeanov (god 2000)* [Tectonics of continents and oceans (year 2000)]. Moscow, Nauchny mir Publ., 2001. 606 p.
2. Ivanov A.I. Riphean-paleozoic ore formation in the Baikal-Patom gold-mining province. *Prospect and protection of mineral resources*, 2009, no. 12, pp. 3–10. In Rus.
3. Arkhangelskaya V.V. Mineral deposits of Patomsky mountainous and their structural position. *Prospect and protection of mineral resources*, 2012, no. 4, pp. 7–10. In Rus.
4. Kolotov B.A. Scientific basis of the hydrogeochemical method in the search for ore deposits. *Razvedka i okhrana nedr*, 2008, no. 4–5, pp. 46–50. In Rus.
5. Guseva N.V., Kopylova Yu.G., Shvartsev S.L. Hydrogeochemical prospecting of gold mineralization in the Enzory-akha and Yunyakha interfluves (the eastern slope of the Polar Ural). *Pro-*

- spect and protection of mineral resources*, 2010, no. 11, pp. 54–58. In Rus.
6. Miroshnikova L.V. Hydrogeochemical features and criteria of sulfide mineralization. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2011, no. 3 (50), pp. 12–17. In Rus.
 7. Parshin A.V., Budyak A.E., Blinov A.V., Kosterev A.N. A set of methods for searching for gold-uranium ore occurrences in the permafrost zone of the Baikal-Amur Railway. *Metallogeniya drevnikh i sovremennykh okeanov*, 2015, no. 21, pp. 177–181. In Rus.
 8. Glebova L.V., Kharlashkina A.K. Hydrochemical monitoring as a tool to reduce adverse impact on the environment in the extraction of hydrocarbon raw material. *Geology, geografya and global energy*, 2015, no. 1 (56), pp. 165–170. In Rus.
 9. Lyapunov M.Yu. Ecological and geochemical characteristics of surface waters of the Pioner gold ore deposit in the Amur Region. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2015, vol. 326, no. 7, pp. 44–50. In Rus.
 10. Goryukhin M.V. Napravleniya potentsialnogo ispolzovaniya otrabotannykh neobvodnennykh karyerov poleznykh iskopayemykh Evreyskoy avtonomnoy oblasti [Areas of potential use of waste not flooded quarries of minerals on the example of the Jewish Autonomous Region]. *Materialy VII Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii* [Materials of the VII All-Russian Scientific Conference]. Ed. by E.Ya. Frisman. Birobidzhan, Institute for the Comprehensive Analysis of Regional Problems of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences Publ., 2018. Vol. 21, no. 3, pp. 49–54.
 11. Zubitsova A.S., Petukhov V.I., Vakh E.A., Zubitsova I.L. Analysis of the ecological condition of the Golden horn bay of Peter the Great bay. *Processes in GeoMedi*, 2018, no. 3 (17), pp. 96–97. In Rus.
 12. Zamana L.V., Usmanov M.T., Borzenko S.V. Hydrochemistry of rivers along the route of the projected oil pipeline «Eastern Siberia – Pacific Ocean» in the Vitim–Olekma interfluvium. *Vodnye resursy*, 2007, vol. 34, no. 3, pp. 345–355. In Rus.
 13. Kuzmin M.I., Tarasova E.N., Bychinsky V.A., Karabanov E.B., Mamontov A.A., Mamontova E.A. Components of the hydrochemical regime of the river Lena. *Vodnye resursy*, 2009, vol. 36, no. 4, pp. 440–451. In Rus.
 14. Goncharov A.V., Isaev V.A., Lobchenko E.E., Nichiporova I.P. Features of the oxygen regime of rivers in the Volga, Ob and Lena basins. *Vodnye resursy*, 2011, vol. 38, no. 5, pp. 564–570. In Rus.
 15. Ksenofontova M.I., Legostaeva Ya.B. Ecological and hydrological characteristics of rivers of South West Yakutia. *Vestnik of North-Eastern Federal University. Series «Earth Sciences»*, 2016, no. 3 (3), pp. 58–68. In Rus.
 16. Georgiadi A.G., Tananaev N.I., Dukhova L.A. Hydrochemical regime of the Lena River in August 2018. *Okeanologiya*, 2019, vol. 59, no. 5, pp. 881–884. In Rus.
 17. Novikov D.A., Maksimova A.A., Pyrayev A.N., Yan P.A. First isotope-hydrogeochemical data on the natural waters of the southeast 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.
 18. Grigoryev N.A. *Raspredelenie khimicheskikh elementov v verkhney chasti kontinentalnoy kory* [Chemical element distribution in the upper continental crust.]. Ekaterinburg, UB RAS Publ., 2009. 383 p. In Rus.
 19. Svanidze I.G., Kremleva T.A., Soromotin A.V. Influence of the artesian basin groundwater of West Siberia on the migration of macroand microelements in minor rivers. *Bulletin of the Tyumen State University Herald. Ecology*, 2012, no. 12, pp. 55–63. In Rus.
 20. *Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiyskoy Federatsii. Masshtab 1:1000000. List O 49* [State geological map of the Russian Federation. Scale 1:1000000. Sheet O 49.]. St-Petersburg, VSEGEI Publ. house, 2012.
 21. Gabyshev V.A., Remigaylo P.A., Gabysheva O.I. Spatial structure and habitat conditions of phytoplankton of the Aldan River. *Bulletin of the Irkutsk State University. Biology. Ecology*, 2012, vol. 5, no. 2, pp. 61–69. In Rus.
 22. Zagorulko N.A. Features of basic ionic composition of the Kuda river basin surface waters. *Bulletin of ISTU*, 2014, no. 2 (85), pp. 61–67. In Rus.
 23. Perelman A.I. *Geokhimiya landshafta* [Landscape geochemistry]. 2nd ed. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1975. 342 p.
 24. Korobova E.M., Ryzhenko B.N., Cherkasova E.V., Sedykh E.M., Korsakova N.V., Danilova V.N., Khushvaktova S.D., Berezkin V.Yu. To the question of the forms of iodine and selenium in natural waters and their concentration on landscape-geochemical barriers. *Geokhimiya*, 2014, no. 6, pp. 554–568. In Rus.
 25. Colombo M., Brown K.A., Vera J.D., Bergquist B.A., Orians K.J. Trace metal geochemistry of remote rivers in the Canadian Arctic Archipelago. *Chemical Geology*, 2019, no. 525, pp. 479–491.
 26. Qin T., Yang P., Groves C., Chen F., Xie G., Zhan Z. Natural and anthropogenic factors affecting geochemistry of the Jialing and Yangtze Rivers in urban Chongqing, SW China. *Applied Geochemistry*, 2018, no. 98, pp. 448–458.
 27. Fu C., Li X., Ma J., Liu L., Gao M., Bai Z., A hydrochemistry and multi-isotopic study of groundwater origin and hydrochemical evolution in the middle reaches of the Kuye River basin. *Applied Geochemistry*, 2018, no. 98, pp. 82–93.
 28. Pant R.R., Zhang F., Rehman F.U., Wang G., Ye M., Zeng C., Tang H. Spatiotemporal variations of hydrogeochemistry and its controlling factors in the Gandaki River Basin, Central Himalaya Nepal. *Science of the Total Environment*, 2018, vol. 622–623, pp. 770–782.
 29. Hindshaw R.S., Teisserenc R., Dantec T.L., Tananaev N. Seasonal change of geochemical sources and processes in the Yenisei River: A Sr, Mg and Li isotope study. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2019, vol. 255, pp. 222–236.
 30. Navarro-Martinez F., Sánchez-Martos F., García A.S., Gallego J.G. The use of major, trace elements and uranium isotopic ratio (^{234U}/^{238U}) for tracing of hydrogeochemical evolution of surface waters in the Andarax River catchment (SE Spain). *Journal of Geochemical Exploration*, 2020, vol. 213, 106533.
 31. Qiao D., Wang G., Li X., Wang S., Zhao Y. Pollution, sources and environmental risk assessment of heavy metals in the surface AMD water, sediments and surface soils around unexploited Rona Cu deposit, Tibet, China. *Chemosphere*, 2020, vol. 248, 125988.
 32. Guo Q., Liu M., Luo L., Yan K., Guo W., Wu G., Yan W., Wang Y. Geochemical controls on magnesium and its speciation in various types of geothermal waters from typical felsic-rock-hosted hydrothermal systems in China. *Geothermics*, 2019, vol. 81, pp. 185–197.
 33. Farhat S., Bali M., Kamel F. Geochemical and statistical studies of Mio-Pliocene aquifer's mineralization in Jerba Island, South-eastern Tunisia. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2019, vol. 111, pp. 35–52.
 34. Ashayeri N.Y., Keshavarzi B. Geochemical characteristics, partitioning, quantitative source apportionment, and ecological and health risk of heavy metals in sediments and water: A case study in Shadegan Wetland, Iran. *Marine Pollution Bulletin*, 2019, vol. 149, 110495.
 35. Kravynov S.R., Ryzhenko B.N., Shvets V.M. *Geokhimiya podzemnykh vod* [Geochemistry of groundwater]. Moscow, Nauka Publ., 2004. 677 p.
 36. Brookins D.G. *Eh-pH diagrams for geochemistry*. Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag, 1988. 184 p.
 37. Howard III J.H. Geochemistry of selenium: formation of ferroselite and selenium behavior in the vicinity of oxidizing sulfide and uranium deposits. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1977, vol. 41, pp. 1665–1678.
 38. *Atlas of Eh-pH diagrams. Intercomparison of thermodynamic databases*. Japan, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology Research Center for Deep Geological Environments Naoto Takeno, 2005. No. 419, 285 p.

Received: 9 June 2021.

Information about the authors

Dmitry A. Novikov, Cand. Sc., head of the laboratory, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences; associate professor, Novosibirsk State University.

Anastasia A. Maksimova, student, Novosibirsk State University.

Denis V. Napreev, chief of the worksite geophysical expedition, Scientific production enterprise of geophysical equipment «Looch».

Yulia G. Kopylova, Cand. Sc., senior researcher, National Research Tomsk Polytechnic University.

Albina A. Khvachevskaya, Cand. Sc., head of the scientific laboratory, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 621.039.54

ПОЛУЧЕНИЕ ОКИСЛИТЕЛЬНОЙ СМЕСИ $N_xO_y-O_2-CO_2-H_2O_{(пар)}$ ДЛЯ ТЕРМОХИМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ОБЛУЧЕННОГО ТОПЛИВА НА ОСНОВЕ ДИОКСИДА УРАНА

Аксютин Павел Викторович¹,
aksutin.zgr@gmail.com

Дьяченко Антон Сергеевич¹,
sage200624@gmail.com

Жабин Андрей Юрьевич¹,
zhabinchemical@mail.ru

Жерин Иван Игнатьевич²,
gerinii@tpu.ru

¹ Горно-химический комбинат,
Россия, 662972, г. Железногорск, ул. Ленина, 53.

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

Актуальность исследования обоснована целесообразностью создания благоприятных условий при проведении термохимической обработки топливных фрагментов с целью обеспечения одновременной трансформации керамического топлива в порошкообразный материал и полного высвобождения продукта реакции из оболочки, а также удаления из топливной композиции перед гидроталлургическими операциями летучих продуктов деления (третий, иод-129, углерод-14, радиоактивные благородные газы).

Цель: определить основные технологические параметры процесса получения окислительной смеси $N_xO_y-O_2-CO_2-H_2O_{(пар)}$, пригодной для использования на операции термохимической обработки фрагментов оболочечного топлива на основе диоксида урана керамического качества.

Объекты: раствор смеси азотной и щавелевой кислот, окислительная смесь $N_xO_y-O_2-CO_2-H_2O_{(пар)}$, образец необлученного твэл на основе диоксида урана.

Методы: экспериментальные исследования, кондуктометрическое и потенциометрическое титрование, гравиметрический и рентгенофазовый анализ, морфологические исследования, газовая хроматография.

Результаты. Исследованы основные физико-химические закономерности процесса получения окислительной смеси $N_xO_y-O_2-CO_2-H_2O_{(пар)}$ для термохимической обработки топлива на основе диоксида урана. Установлено, что при пропускании раствора смеси кислот (азотная кислота – 380 г/л, щавелевая кислота – 80 г/л) со скоростью 5 колон. об./час через слой катализатора $Pt/Cr_2O_3/ZrO_2$ при температуре 368–373 К происходит образование газового потока, содержащего 26 об. % диоксида азота, 20 об. % монооксида азота, 44 об. % диоксида углерода, 10 об. % паров воды. Доокисление монооксида азота и каталитическую активацию полученного газового потока предпочтительно проводить на насадке $Pt/Cr_2O_3/ZrO_2$ при температуре 413 К и соотношении высоты насадочного слоя к диаметру колонны 5:1, в результате чего полученная окислительная смесь соответствует следующему составу: 41 об. % диоксида азота, 6 об. % монооксида азота, 42 об. % диоксида углерода, 6 об. % паров воды, 5 об. % кислорода. Показана принципиальная возможность трансформации керамического топлива на основе необлученного диоксида урана, заключенного в циркониевую оболочку, в порошкообразный октаоксид триурана с использованием в качестве окислителя каталитически активированной смеси $N_xO_y-O_2-CO_2-H_2O_{(пар)}$. Получен порошкообразный материал, полностью отделенный от циркониевой оболочки, который по результатам рентгенофазового и гравиметрического анализа (соотношение $O/U=2,67$) соответствовал формуле U_3O_8 .

Ключевые слова:

Смесь азотной и щавелевой кислот, каталитическое разложение, окислительная смесь, каталитически активная насадка, керамическое топливо, порошкообразный материал.

Введение

Одним из перспективных путей усовершенствования технологии переработки отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) является проведение перед гидроталлургическими операциями предварительной термохимической обработки фрагментов топлива в окислительной атмосфере. В результате окислительного процесса происходит трансформация керамического топлива в порошкообразное состояние и отделение его от оболочки, а также удаление летучих продуктов деления в газовую фазу [1]. Как правило, в

качестве окислителя используют кислород как в чистом виде, так и в смеси с другими газами-окислителями, например, с диоксидом азота.

Использование в качестве дополнительного окислителя диоксида азота позволяет интенсифицировать процесс трансформации керамического топлива в порошкообразный материал, а образующийся в результате реакции монооксид азота при обратной диффузии с реакционной поверхностью в объем газовой фазы диспергирует материал и предотвращает его спекание, а также открывает доступ окислительной смеси к «свежей» поверхности топлива.

В литературе [2–5] описаны способы термохимической обработки фрагментов оболочечного топлива на основе диоксида урана керамического качества с использованием в качестве окислителя смеси диоксида азота и кислорода. Получение окислительной смеси проводят путем диссоциации жидкого тетраоксида азота при температуре выше 295,4 К с образованием газообразного диоксида азота, который смешивают с потоком кислорода. Полученную газовую смесь используют в качестве окислителя на операции термохимической обработки ОЯТ. Данный способ подготовки окислительной смеси технически сложен для реализации в промышленном масштабе в связи с невозможностью формирования устойчивого потока питания, а также с необходимостью постоянной стабилизации концентрации окислительных агентов в газовой фазе и применения специализированного газосмесительного оборудования.

Использование окислительной смеси с несколькими окислителями (O_2 и NO_2), а также включение в состав реакционной системы диоксида углерода и паров воды позволяет повысить скорость трансформации керамического топлива на основе диоксида урана и интенсивность отделения летучих продуктов деления (тригий, углерод-14, иод-129, инертные газы) без возгонки других компонентов ОЯТ [6]. Поэтому весьма актуальной является разработка простого и универсального способа получения многокомпонентной газовой смеси, состоящей из нескольких окислительных агентов, карбонирующего компонента для связывания цезия-137, а также паров воды, катализирующих процесс окисления диоксида урана.

Известен [7] способ получения газовой смеси, основанный на окислительно-восстановительной реакции взаимодействия уксусной и азотной кислот, в результате которой происходит образование диоксида азота, диоксида углерода, монооксида углерода и паров воды. Однако данный способ имеет существенный недостаток – получение в качестве газообразного продукта реакции ядовитого монооксида углерода, требующего при обращении с ним повышенных мер безопасности. Другой недостаток способа – использование уксусной кислоты, попадание которой на последующие гидрометаллургические операции приведет к дополнительным сложностям при ведении технологического процесса, в том числе к увеличению нагрузки на систему газоочистки.

Практический интерес представляет процесс разложения раствора смеси азотной и щавелевой кислот на каталитически активной насадке, в результате которого происходит образование газовой смеси, одновременно состоящей из оксидов азота, диоксида углерода и паров воды. Авторами [8] показана возможность использования газообразных продуктов реакции в качестве окислителя на операции термохимической обработки фрагментов топлива, однако в работе отсутствуют данные о технологических режимах процесса получения окислительной смеси.

В ходе проведения поисковых исследований [9] установлено, что наиболее приемлемое соотношение оксидов азота ($NO_2:NO$) в окислительной смеси для

термохимической обработки фрагментов топлива, составляет (7–6,5):1. Присутствие в газовом потоке небольшого количества (до 5 об. %) кислорода и паров воды ускоряет процесс трансформации керамического топлива на основе диоксида урана в порошок октаоксида триурана.

В связи с вышеизложенным целью работы являлось определение основных технологических параметров процесса получения окислительной смеси $N_xO_y-O_2-CO_2-H_2O_{(пар)}$, пригодной для использования на операции термохимической обработки фрагментов оболочечного топлива на основе диоксида урана керамического качества.

Экспериментальная часть

Материалы и реагенты

Для проведения экспериментов использовали азотную кислоту марки «ч.» по ГОСТ 4461-77, щавелевую кислоту марки «х.ч.» по ГОСТ 22180-76 и фрагменты твэл производства ПАО «НЗХК» со свежим (необлученным) ядерным топливом типа ВВЭР-1000 с массовой долей урана-235 не более 0,72 мас. %.

Партию катализатора нарабатывали самостоятельно. Подготовку каталитически активной насадки $Pt/Cr_2O_3/ZrO_2$ проводили согласно методике, представленной в работе [10]. Для синтеза каталитически активной насадки $Pt/Cr_2O_3/ZrO_2$ использовали: хлорид циркония ТУ 6-09-3677-74, нитрат хрома (III) по ГОСТ 4471-78. В качестве каталитически активного компонента насадки использовали платину (раствор $H_2[PtCl_6]$).

В результате синтезирован материал с развитой каталитически активной поверхностью и крупностью частиц 0,8–1,2 мм (рис. 1). Массовое содержание платины в катализаторе составило 0,3–0,5 %, содержание хрома – 8–10 %, носитель – диоксид циркония.

Аналитическое сопровождение экспериментов

Определение содержания азотной и щавелевой кислоты в растворах выполняли методом кондуктометрического и потенциометрического титрования [11, 12]. Относительная погрешность измерений для кондуктометрического метода составляет 10 %, для потенциометрии – 8 %.

Контроль содержания компонентов в окислительной смеси осуществляли с помощью хроматографа «Газохром-2000» и газоанализатора «ВТИ-2». Относительная погрешность измерений составляет около 7 %.

Морфологические исследования структуры полученной каталитически активной насадки и определение крупности частиц катализатора проводили при помощи сканирующего электронного микроскопа Vega 3LMU.

Методика проведения экспериментов

Процесс получения окислительной смеси $N_xO_y-O_2-CO_2-H_2O_{(пар)}$ основан на реакции (1) каталитического разложения раствора смеси азотной и щавелевой кислот при температуре 363–368 К.



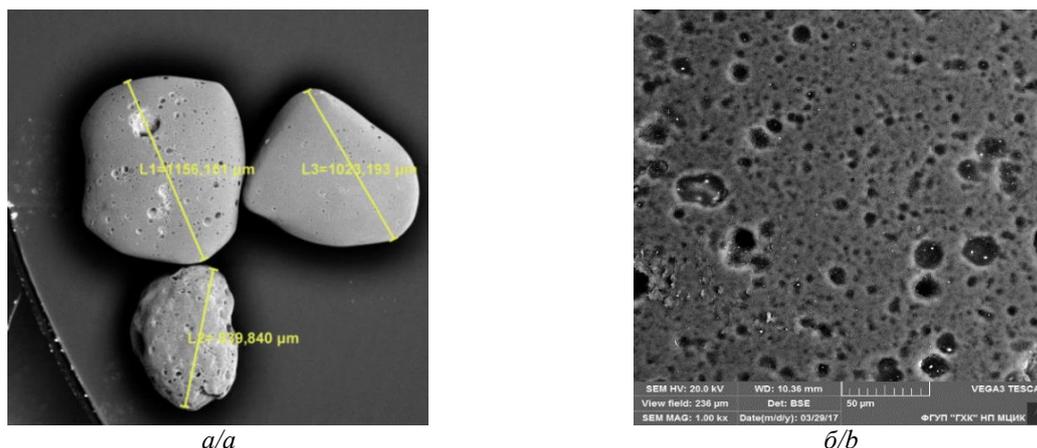


Рис. 1. Крупность (а) и поверхность (б) частиц каталитической насадки $Pt/Cr_2O_3/ZrO_2$
Fig. 1. Particle size (a) and particle surface (b) of $Pt/Cr_2O_3/ZrO_2$ catalytic packing material

При различном составе раствора смеси кислот в зависимости от концентрации азотной кислоты происходит образование газового потока, состоящего из оксидов азота, диоксида углерода и паров воды. Содержание щавелевой кислоты в растворе постоянно и составляет 80 г/л, что гарантированно обеспечивает постоянный состав смеси кислот в этих условиях (отсутствует выпадение щавелевой кислоты в осадок). Известно [13], что в диапазоне концентраций азотной кислоты 90–260 г/л преобладает реакция с образованием монооксида азота, а в диапазоне 260–515 г/л – диоксида азота. Ориентировочное соотношение между оксидами азота, образующимися в результате реакции каталитического восстановления азотной кислоты, представлено на диаграмме (рис. 2). Видно, что увеличение концентрации азотной кислоты приводит к увеличению выхода диоксида азота.

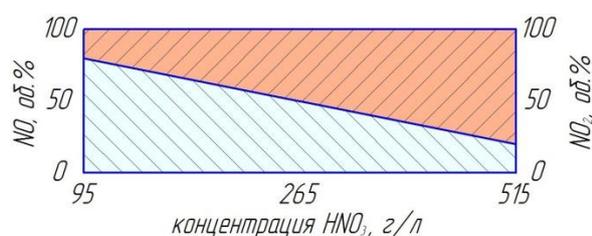
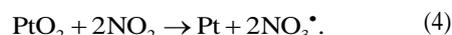


Рис. 2. Содержание оксидов азота в газовом потоке в зависимости от концентрации азотной кислоты
Fig. 2. Nitric oxides content in gas flow against nitric acid concentration

Процесс термохимической деструкции керамического топлива наиболее активно происходит при дополнительном участии сверхокисленных форм кислородных соединений азота. С целью увеличения количества окислительно-активных компонентов газовой смеси и повышения доли радикалов типа NO_3^{\cdot} и оксидов типа NO_3 , N_2O_6 полученный газовый поток дополнительно пропускали через слой каталитически активной насадки ($Pt/Cr_2O_3/ZrO_2$) при температуре 403–423 К. Образование сверхокисленных форм наиболее вероятно происходит по реакциям (2)–(4) [14, 15]:



На рис. 3 представлена блок-схема экспериментальной установки получения окислительной смеси $N_xO_y-O_2-CO_2-H_2O_{(пар)}$.

Установка функционирует следующим образом. В реактор-смеситель (1), оборудованный внешней греющей рубашкой, дозировали расчетное количество воды. Из мерника (3) самотеком в реактор-смеситель (1) подавали раствор азотной кислоты (750–900 г/л) до получения необходимой концентрации. Усреднение раствора проводили путем перемешивания содержимого реактора-смесителя (1) барботажным воздухом. Перед внесением щавелевой кислоты раствор азотной кислоты нагревали до температуры 328–333 К, после чего через загрузочное отверстие вносили щавелевую кислоту в виде сухого реагента непосредственно в реактор-смеситель (1) до получения раствора требуемых кондиций по содержанию азотной и щавелевой кислот. Полученный раствор смеси кислот перемешивали барботажным воздухом в течение 20 минут до полного усреднения раствора при температуре 328–333 К. Питающий поток смеси кислот с помощью перистальтического насоса (4) дозировали в предварительно подготовленную насадочную колонну (2).

Насадочная колонна (2) представляет собой вертикальный термостатируемый аппарат с нижней подачей раствора, имеющий зону ламинарного движения потока, зону катализа, зону газоотделения. Зона катализа отсечена сетчатыми перегородками. Приготовленный катализатор $Pt/Cr_2O_3/ZrO_2$ засыпали через верхний загрузочный люк и уплотняли верхней сетчатой перегородкой. Соотношение высоты к диаметру зернистого слоя насадки выбирали из диапазона (7,3:1)–(10:1), который на основании данных работы [16] и предварительных поисковых экспериментов обеспечивает максимальную производительность насадочной колонны (2) и полноту расходования реагентов. Температурный режим в колонне (2) поддерживали с помощью термостата (5).

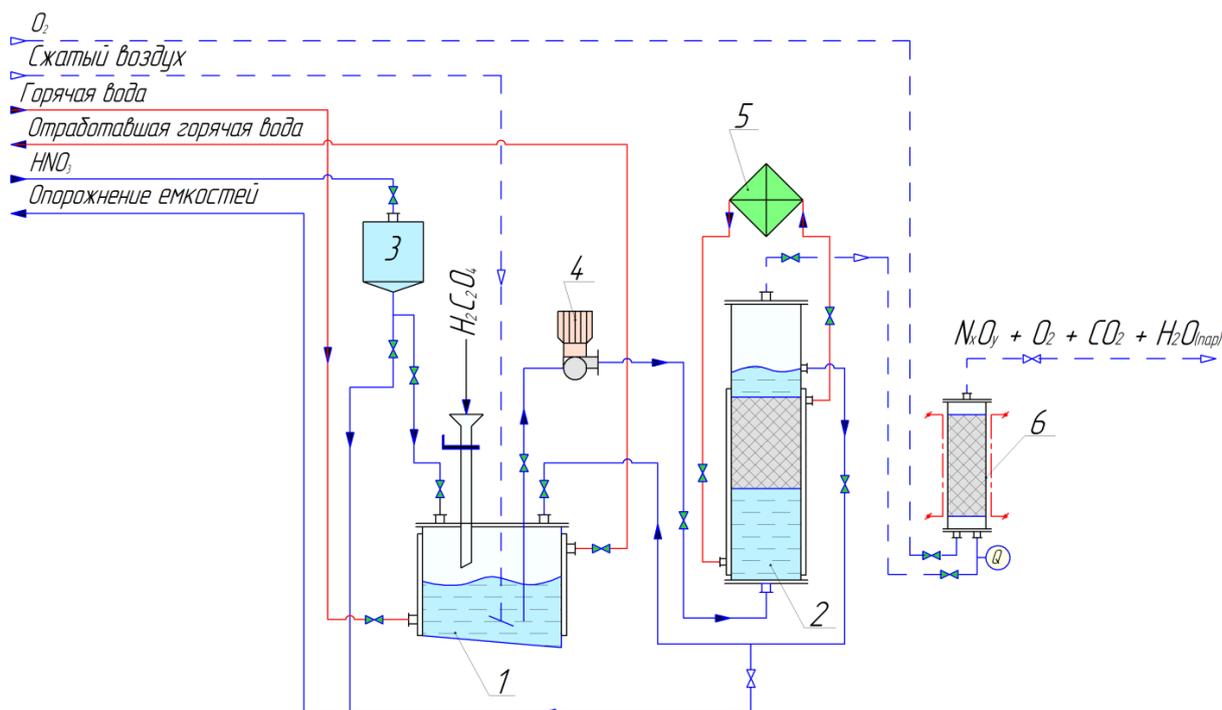


Рис. 3. Блок-схема экспериментальной установки получения окислительной смеси: 1 – реактор-смеситель; 2 – насадочная колонна; 3 – мерник HNO_3 ; 4 – перистальтический насос; 5 – жидкостный термостат Julabo; 6 – насадочная колонна

Fig. 3. Pilot installation flow chart for acquisition of oxidizing mixture: 1 – mixer-reactor; 2 – packed column; 3 – HNO_3 measurer; 4 – peristaltic pump; 5 – Julabo liquid thermostat; 6 – packed column

С целью увеличения концентрации NO_2 и каталитической активации получаемый газовый поток пропускали через слой каталитически активной насадки ($Pt/Cr_2O_3/ZrO_2$), засыпанной в колонну (6), при температуре 403–423 К. Для этого в колонну дополнительно вводили поток кислорода в количестве 8–10 об. % от основного газового потока, образующегося в колонне (2) в результате каталитического разложения раствора смеси кислот. На выходе из колонны получали окислительную смесь $N_xO_y-O_2-CO_2-H_2O_{(пар)}$, которую использовали для термохимической обработки фрагментов имитатора ОЯТ на основе диоксида урана.

В ходе экспериментов для определения содержания компонентов в получаемом газовом потоке ежедневно осуществляли пробоотбор смеси до и после колонны (6), выходящий водный поток с колонны (2) каждые 30 минут анализировали на остаточное содержание азотной и щавелевой кислот.

Экспериментальная установка обеспечивала производительность по окислительной смеси $N_xO_y-O_2-CO_2-H_2O_{(пар)}$ около 50 л/ч.

Обсуждение результатов

В ходе проведения исследований были определены основные технологические параметры процесса получения окислительной смеси $N_xO_y-O_2-CO_2-H_2O_{(пар)}$ для термохимической обработки фрагментов оболочечного топлива на основе диоксида урана керамического качества.

Для определения влияния содержания азотной кислоты на состав газовой смеси провели серию экспериментов при различном составе питающего пото-

ка кислот, поступающего на операцию каталитического разложения. При приготовлении питающего водного потока установлено, что растворимость щавелевой кислоты в растворе азотной кислоты в температурном диапазоне от 343–368 К составляет около 8 г/100 мл азотной кислоты (независимо от концентрации азотной кислоты), при этом она слабо зависит от температуры и интенсивности перемешивания.

Состав газового потока и содержание компонентов в потоке, полученном в результате каталитического разложения смеси кислот в насадочной колонне (2), в зависимости от концентрации азотной кислоты в питающем потоке кислот, представлен на рис. 4.

Анализируя полученные экспериментальные данные (рис. 4), можно заключить, что с ростом концентрации азотной кислоты при постоянном содержании щавелевой кислоты происходит увеличение содержания диоксида азота при одновременном взаимном уменьшении количества монооксида азота в образующемся газовом потоке. Важно отметить, что содержание диоксида углерода и паров воды в газовом потоке постоянно и не зависит от концентрации азотной кислоты в исходном растворе.

Например, при пропускании через слой каталитической насадки (отношение высоты слоя к диаметру 8:1) раствора, содержащего азотной кислоты – 380 г/л, щавелевой кислоты – 80 г/л, происходит образование газового потока, содержащего 26 об. % диоксида азота, 20 об. % монооксида азота, 44 об. % диоксида углерода, 10 об. % паров воды. В данном случае при умеренном содержании азотной кислоты в исходной смеси получен газовый поток с приемлемым соотно-

шением между оксидами азота, который после дополнительной активации пригоден для использования на операции термохимической обработки фрагментированного топлива на основе диоксида урана. Объемное соотношение между поступающим в каталитическую колонну раствором и образующейся газовой фазой составляет 1:45.

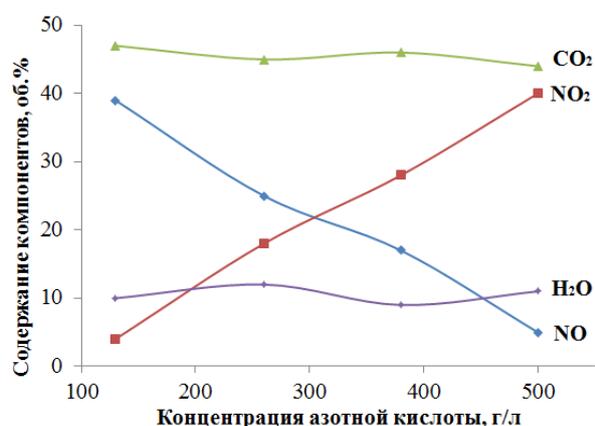


Рис. 4. Влияние содержания азотной кислоты в питающем потоке кислот на состав газового потока. Параметры процесса: содержание $H_2C_2O_4$ в питающем потоке – 80 г/л; расход питающего потока – 5 колон. об/час; $T_{\text{процесса разлож-я}}=368$ К; каталитическая насадка – $Pt/Cr_2O_3/ZrO_2$; отношение высоты каталитической насадки к диаметру колонны (2) – 8:1

Fig. 4. Effect of nitric acid in supply acid stream on gas flow composition. Process parameters: $H_2C_2O_4$ content in supply stream – 80 g/l; rate of supply stream – 5 column volumes per hour; $T_{\text{decomposition process}}=368$ K, catalytic packing – $Pt/Cr_2O_3/ZrO_2$; height of catalytic packing to column diameter (2) – 8:1

Для определения влияния скорости дозирования питающего раствора и температуры процесса на полноту разложения кислот питающего потока провели серию экспериментов. По экспериментальным данным построены графические зависимости степени разложения компонентов питающего потока от скорости дозирования исходного раствора кислот при различных температурах каталитического разложения смеси кислот, которые представлены на рис. 5.

При рассмотрении экспериментальных данных (рис. 5) можно сделать вывод, что при увеличении скорости дозирования исходного потока кислот полнота разложения компонентов снижается во всем рассматриваемом температурном диапазоне. В свою очередь полнота разложения компонентов исходного раствора кислот прямо пропорциональна температуре.

Результаты экспериментов свидетельствуют о том, что все зависимости проходят через максимум при дозировании питающего потока кислот со скоростью 5 колон. об./ч при выбранной высоте слоя активной насадки. Определено, что при температуре 368 К происходит практически полное разложение кислот. Отработавший водный поток содержал около 15 г/л азотной кислоты (~4 % от исходного содержания в смеси) и менее 1 г/л щавелевой кислоты (~1 % от исходного

содержания в смеси). Потенциально этот раствор после доукрепления до исходных кондиций можно повторно использовать для получения окислительной смеси.

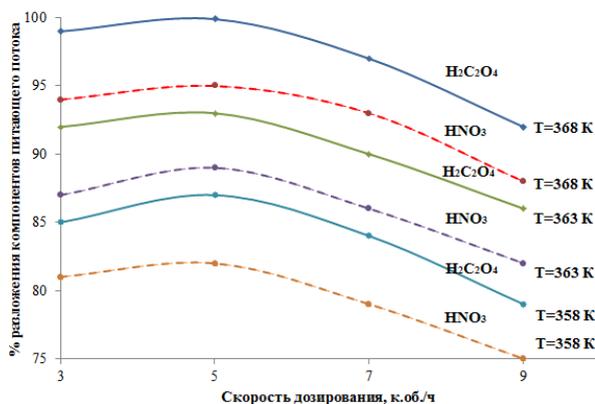


Рис. 5. Влияние скорости дозирования на степень разложения компонентов смеси кислот при различных температурах. Параметры процесса: состав смеси кислот – HNO_3 – 380 г/л; $H_2C_2O_4$ – 80 г/л; каталитическая насадка – $Pt/Cr_2O_3/ZrO_2$; отношение высоты каталитической насадки к диаметру колонны (2) – 8:1

Fig. 5. Effect of dosing rate on decomposition level of acid mixture components at different temperatures. Process parameters: acid mixture components – HNO_3 – 380 g/l; $H_2C_2O_4$ – 80 g/l; catalytic packing – $Pt/Cr_2O_3/ZrO_2$; height of catalytic packing to column diameter (2) – 8:1

В свою очередь, при дозировании питающего потока кислот со скоростью 7 и 9 колон. об./ч не происходит полного разложения кислот, вероятно, по причине малого времени контакта раствора с каталитической насадкой (менее 7 минут). Это снижает эффективность процесса получения газового потока (объемное соотношение между поступающим в каталитическую колонну раствором и образующейся газовой фазой уменьшается). Снижение скорости дозирования менее 5 колон. об./ч нецелесообразно из-за возможности образования и конденсации в насадочной части каталитической колонны (2) азотной кислоты.

Таким образом, для обеспечения полноты превращения и достижения наибольшей концентрации диоксида азота процесс каталитического разложения смеси азотной и щавелевой кислот необходимо проводить при скорости дозирования исходного потока смеси кислот (HNO_3 – 380 г/л; $H_2C_2O_4$ – 80 г/л) равной 5 колон. об./ч и температуре 368 К.

Одними из основных компонентов газового потока, образованного в результате разложения смеси кислот на каталитически активной насадке, являются диоксид азота (около 26 об. %) и монооксид азота (до 20 об. %). Для снижения доли монооксида азота до требуемых кондиций, а также одновременного увеличения содержания диоксида азота и его сверхокисленных форм (требуемое соотношение $NO_2:NO=(7,5-6):1$) необходимо дополнительно пропустить полученный газовый поток через слой каталитически активной насадки при температуре 413 К.

С целью определения влияния высоты слоя каталитически активной насадки на полноту окисления оксидов азота в колонне (6) была проведена серия экспериментов по изучению влияния высоты слоя каталитически активной насадки $Pt/Cr_2O_3/ZrO_2$ на содержание NO_2 в газовой смеси; результаты экспериментов представлены на рис. 6.

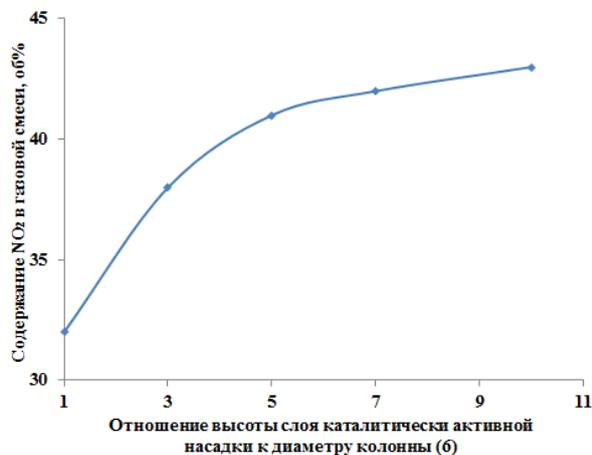


Рис. 6. Влияние высоты слоя каталитически активной насадки на содержание NO_2 в окислительной смеси. Параметры процесса: состав питающего потока кислот – HNO_3 – 380 г/л; $H_2C_2O_4$ – 80 г/л; расход питающего потока кислот – 5 колон. об/ч; $T_{процесса\ разлож-я}$ = 368 К; отношение высоты каталитической насадки к диаметру колонны (2) – 8:1; состав газового потока на операцию доокисления (об. %): NO_2 – 26; NO – 20; H_2O – 11; CO_2 – 43; $T_{процесса\ доокис-я}$ = 413 К; каталитическая насадка – $Pt/Cr_2O_3/ZrO_2$

Fig. 6. Effect of height catalytically active packing on NO_2 content in oxidizing mixture. Process parameters: composition of acid supply stream – HNO_3 – 380 g/l; $H_2C_2O_4$ – 80 g/l; rate of supply acid stream – 5 column volumes per hour; $T_{decomposition\ process}$ = 368 K; height of catalytic packing to column diameter (2) – 8:1; gas flow composition used for full oxidation procedure (vol. %) – NO_2 – 26; NO – 20; H_2O – 11; CO_2 – 43; $T_{decomposition\ process}$ = 413 K, catalytic packing – $Pt/Cr_2O_3/ZrO_2$

Из графической зависимости, представленной на рис. 6, видно, что на начальном этапе с увеличением высоты слоя каталитически активной насадки растет доля диоксида азота в выходящем газовом потоке. Однако после достижения определенного значения количество диоксида азота в выходящем газовом потоке практически не зависит от высоты насадочной части колонны (6).

Анализ экспериментальных данных (рис. 6) показывает, что процесс окисления NO и каталитической активации газообразных продуктов (NO_2 ; NO ; H_2O ; CO_2), полученных в результате разложения раствора смеси кислот, наиболее целесообразно проводить при соотношении высоты слоя каталитически активной насадки к диаметру колонны (5:1)÷(7:1). В этом случае происходит увеличение содержания диоксида азота (в том числе образование сверхокисленных форм и паров азотной кислоты) в газовой смеси при-

мерно на 60 %. Дальнейшее увеличение высоты слоя не приводит к значительному увеличению доли диоксида азота в окислительной смеси. Содержание монооксида азота в окислительной смеси в данных условиях составляет не более 6 %.

Окислительную смесь $N_xO_y-O_2-CO_2-H_2O_{(пар)}$, полученную при каталитическом взаимодействии азотной и щавелевой кислот с последующим окислением газообразных продуктов реакции на каталитически активной насадке (технологические параметры процесса получения окислительной смеси представлены в таблице), использовали на операции термохимической обработки образцов твэл со свежим (необлученным) ядерным топливом типа ВВЭР-1000.

Таблица. Технологические параметры процесса получения окислительной смеси $N_xO_y-O_2-CO_2-H_2O_{(пар)}$

Table. Technological parameters of producing $N_xO_y-O_2-CO_2-H_2O_{(steam)}$ oxidizing mixture

| Технологический параметр Technological parameter | Значение Description |
|--|--|
| Состав питающего потока кислот Composition of supply acid stream | HNO_3 – 380 г/л; $H_2C_2O_4$ – 80 г/л HNO_3 – 380 g/l; $H_2C_2O_4$ – 80 g/l |
| Расход питающего потока Rate of supply stream | 5 колон. об/ч 5 column volumes per hour |
| Температура процесса разложения Temperature of decomposition process | 368–372 К |
| Материал каталитически активной насадки Catalytically active packing material | $Pt/Cr_2O_3/ZrO_2$ |
| Крупность частиц катализатора Size of catalyst particles | 0,8–1 мм/мм |
| Соотношение высоты насадочного слоя к диаметру колонны на операции каталитического разложения Height of packing bed to column diameter ratio used for catalytic decomposition | 8:1 |
| Температура процесса каталитической активации Catalytic activation temperature | 413 К |
| Соотношение высоты насадочного слоя к диаметру колонны на операции каталитической активации Height of packing bed to column diameter ratio used for catalytic activation | 5:1 |

В результате получили порошкообразный материал, полностью (более 99,9 %) отделенный от циркониевой оболочки. По результатам гравиметрического анализа соотношение O/U в полученном порошке составило 2,67, что соответствует брутто-формуле U_3O_8 . Определение фазового состава полученного порошка проводили с помощью рентгеновского дифрактометра ДРОН 4-07. Дифрактограмма порошка представлена на рис. 7.

Сравнение дифрактограммы полученного порошка (рис. 7) с результатами рентгенофазового анализа, представленными в работах [17–20], показало их идентичность (характерные рефлексы в области 2θ : 21,5; 26; 34; 44; 46; 47; 52 совпадают), что свидетельствовало о получении материала с брутто-формулой U_3O_8 и подтверждало результаты гравиметрического метода анализа.

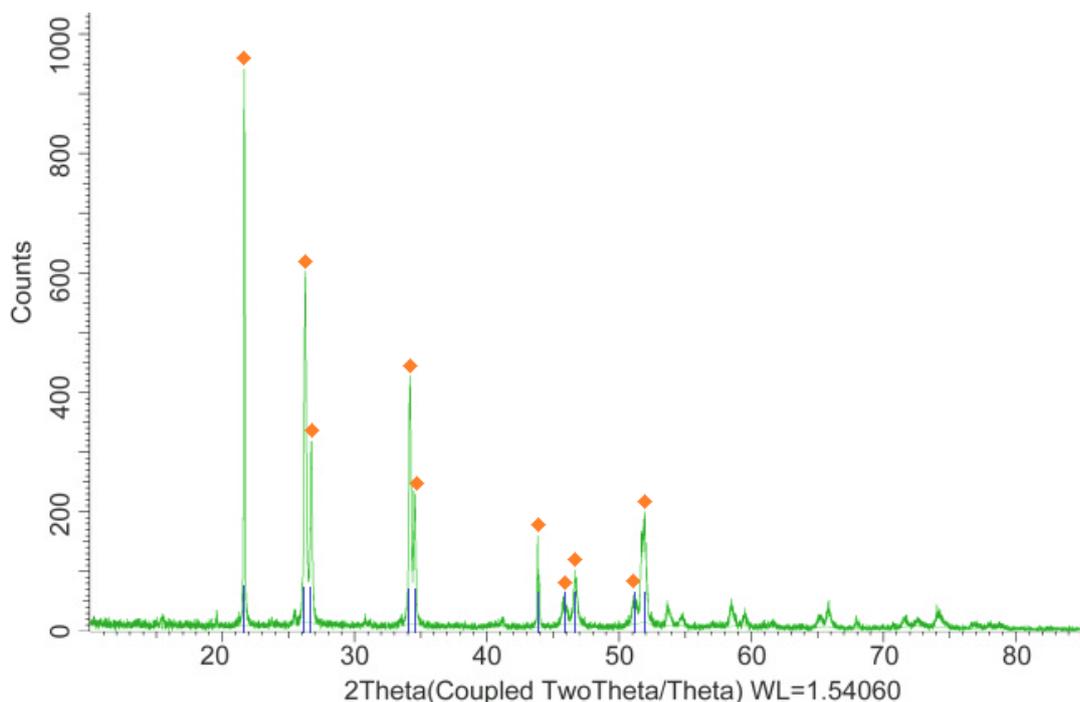


Рис. 7. Дифрактограмма порошка, полученного после термохимической обработки необлученного топливного фрагмента на основе UO_2

Fig. 7. XRD pattern of powder as a result of thermochemical treatment of a new fuel fragment containing uranium dioxide

Заключение

В ходе проведения исследований установлены основные технологические параметры процесса получения окислительной смеси $N_xO_y-O_2-CO_2-H_2O_{(пар)}$, содержащей 41 об. % диоксида азота, 6 об. % монооксида азота, 42 об. % диоксида углерода, 6 об. % паров воды, 5 об. % кислорода. Экспериментально установлено, что при обработке необлученного фрагмента ТВЭЛ полученной окислительной смесью происходит конверсия диоксида урана в октаоксид триурана при одновременном отделении порошкообразного материала от оболочки.

Преимущество рассматриваемого способа получения окислительной смеси состоит в том, что в рассматриваемом температурном диапазоне изменение температуры практически не оказывает влияния на процесс её синтеза. Основной компонент смеси – диоксид углерода, формирует упругость газового потока, а при обработке ОЯТ будет подавлять выход радиоактивного цезия-137 в газовую фазу в результате

образования различных карбонатных соединений в основной фазе продукта. В составе газовой смеси помимо диоксида углерода присутствуют несколько окислительных агентов (диоксид азота, кислород, сверхокисленные соединения азота), а также пары воды, катализирующие процесс перехода диоксида урана в октаоксид триурана и повышающие степень детритизации топлива. К достоинствам данного способа можно отнести простоту аппаратного оформления процесса, получение окислительной смеси постоянного состава в непрерывном режиме и применение реагентов, широко используемых в радиохимической технологии.

Положительные результаты экспериментов позволяют сделать вывод о перспективности применения полученной смеси $N_xO_y-O_2-CO_2-H_2O_{(пар)}$ в качестве окислителя при подготовке ОЯТ (волоксидация) к гидрометаллургическим операциям.

Работа выполнена в рамках программы развития ТПУ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Карелин В.А., Страшко А.Н. Технология переработки облученного ядерного топлива. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2018. – 89 с.
2. Advanced dry head-end reprocessing of light water reactor spent nuclear fuel: pat. 8574523 US, № 2011/0250108; 2013.
3. Johnson J.A. Studies of reaction process for voloxidation methods: diss. PhD. – Knoxville, 2013. – 121 p.
4. Sawada K., Hirabayashi D., Enokida Y. Conversion of uranium oxide into nitrate with nitrogen dioxide // Journal of Power and Energy Systems. – 2008. – V. 2. – № 2. – P. 557–560.
5. Способ окислительной обработки (волоксидации) облученного ядерного топлива: пат. 2654536 Рос. Федерация. № 2017129207; заявл. 15.08.2017; опубл. 21.05.2018, Бюл. № 15. – 17 с.
6. Способ переработки облученного ядерного топлива: пат. 2459299 Рос. Федерация. № 2011115665/07; заявл. 20.04.2011; опубл. 20.08.2012, Бюл. № 23. – 5 с.
7. Rudakov D.A. A new method of nitrogen dioxide production // Researchgate. – 2018. URL: www.researchgate.net/publication/325846942 (дата обращения: 18.01.2021).
8. Способ окислительной обработки (волоксидации) облученного ядерного топлива: пат. 2619583 Рос. Федерация. № 2016135601; заявл. 01.09.2016; опубл. 17.05.2017, Бюл. № 14. – 12 с.
9. Низкотемпературная окислительная обработка фрагментированного топлива на основе диоксида урана: отчет о НИР / рук. Жабин А.Ю.; исполн. Аксютин П.В., Дьяченко А.С., Поляков И.Е. – Железногорск: Горно-химический комбинат, 2019. – 122 с.

10. Annuar N.H.R., Triwahyono S., Jalil A.A. Effect of Cr_2O_3 loading on the properties and cracking activity of Pt/ Cr_2O_3 - ZrO_2 // Applied Catalysis A, General. – 2017. – V. 541. – P. 77–86.
11. Азотная кислота. Определение содержания в технологических растворах методом кондуктометрического титрования: инструкция предприятия / рук., исполн. Барцев В.Н., Загладкина М.А. – Железногорск: Горно-химический комбинат, 2019. – 18 с.
12. Щавелевая кислота. Определение содержания в технологических продуктах: инструкция предприятия / рук. Падалкин П.А., исполн. Барцев В.Н., Загладкина М.А. – Железногорск: Горно-химический комбинат, 2018. – 15 с.
13. Матюха В.А., Матюха С.В. Оксалаты редкоземельных элементов и актинидов. – М: ИздАТ, 2008. – 607 с.
14. Ананьев А.В., Тананьев И.Г., Шилов В.П. Гетерогенно-каталитические окислительно-восстановительные реакции в химии и технологии ядерного топливного цикла // Успехи химии. – 2005. – Т. 74. – № 11. – С. 1132–1155.
15. Кожихина А.В. Катализаторы для окислительно-восстановительного взаимодействия оксидов азота и углерода (II): дис. ... канд. хим. наук. – Саратов, 2008. – 135 с.
16. Способ каталитической денитрации жидких радиоактивных отходов: пат. 2593163 Рос. Федерация. № 2015118099/05; заявл. 14.05.2015; опубл. 27.07.2016, Бюл. № 21. – 8 с.
17. Schwartz D.S., Tandon L., Martinez P., Morphological Comparison of U_3O_8 Ore Concentrates from Canada Key Lake and Namibia Sources. Report of Los Alamos national laboratory. – 2016. – 25 p.
18. Kang K.H., Na S.H., Song K.C. Oxidation behavior of the simulated fuel with dissolved fission product in air at 573–873 K // Thermochemica Acta. – 2007. – V. 435. – P. 129–133.
19. Rui L. The study of pre-oxidation and low temperature sintering mechanism to UO_2+x pellets // Advanced Materials Research. – 2014. – V. 1053 – P. 80–86.
20. Газофазное объемное окисление мононитрида урана / С.А. Кулюхин, Ю.М. Неволин, А.В. Гордеев, А.А. Бессонов // Радиохимия. – 2019. – Т. 61. – № 2. – С. 108–116.

Поступила 16.06.2021 г.

Информация об авторах

Аксютин П.В., инженер-радиохимик, Горно-химический комбинат.

Дьяченко А.С., ведущий инженер, Горно-химический комбинат.

Жабин А.Ю., начальник лаборатории, Горно-химический комбинат.

Жерин И.И., доктор химических наук, профессор Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 621.039.54

PRODUCTION OF $N_xO_y-O_2-CO_2-H_2O_{(STEAM)}$ FOR THERMOCHEMICAL TREATMENT OF IRRADIATED UO_2 FUEL

Pavel V. Aksyutin¹,
aksutin.zgr@gmail.com

Anton S. Dyachenko¹,
sage200624@gmail.com

Andrey Yu. Zhabin¹,
zhabinchemical@mail.ru

Ivan I. Zherin²,
gerinii@tpu.ru

¹ Mining and Chemical Combine,
53, Lenin street, Zheleznogorsk, 662972, Russia.

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

The relevance of the research is based on the rationale for creating suitable environment for fuel thermochemical treatment to ensure simultaneous ceramic fuel conversion into powder-like material, complete re-cladding of reaction product, and volatile fission products entrapment (tritium, iodine-129, carbon-14, radioactive noble gases) from fuel composition prior to hydrometallurgical processes.

The main aim is to find main process parameters of $N_xO_y-O_2-CO_2-H_2O_{(steam)}$ oxidizing mixture which can be used for thermochemical treatment of cladded fuel containing ceramic uranium dioxide.

Subjects: solution of nitric acid and oxalic acid composition, $N_xO_y-O_2-CO_2-H_2O_{(steam)}$ oxidizing mixture, sample of new fuel element containing uranium dioxide.

Methods: investigational studies, conductometric and potentiometric titration, gravimetric and X-ray phase analysis, morphological studies, gas chromatography.

The results. The main physical and chemical rules of fabricating $N_xO_y-O_2-CO_2-H_2O_{(steam)}$ oxidizing mixture were studied for thermochemical treatment of fuel containing uranium dioxide. It was found that generation of gas bearing nitrogen dioxide (26 vol. %), nitrogen monoxide (20 vol. %), carbon dioxide (44 vol. %) and water vapor (10 vol. %) was the result of passing acids mixture (nitric acid – 380 g/l, oxalic acid – 80 g/l) at the rate of 5 column volumes per hour through Pt/Cr₂O₃/ZrO₂ catalyst layer at 368–373 K. It is preferable to implement nitrogen monoxide full oxidation and gas catalytic activation by means of Pt/Cr₂O₃/ZrO₂ packing at 413 K and height of packed bed to column diameter ratio as 5:1. Upon doing that, oxidizing mixture has the following composition: nitrogen dioxide (41 vol. %), nitrogen monoxide (6 vol. %), carbon dioxide (42 vol. %), water vapor (6 vol. %) and oxygen (5 vol. %). Ability in principle to convert ceramic fuel containing non-irradiated uranium dioxide in zirconium cladding into powder-like triuranium octoxide was proven by using $N_xO_y-O_2-CO_2-H_2O_{(steam)}$ mixture as an oxidizing agent following catalytic activation. We made powder-like material separated from zirconium cladding in full which corresponds to molecular formula U_3O_8 from X-ray phase and gravimetric analyses, $O/U=2,67$.

Key words:

Mixture of nitric and oxalic acids, catalytic decomposition, oxidizing mixture, catalytically-active material packing, ceramic fuel, powder-like material.

This research was supported by TPU development program.

REFERENCES

- Karelin V.A., Strashko A.N. *Pererabotka obluchennogo yadernogo topliva* [Reprocessing of irradiated nuclear fuel]. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ. house, 2018. 89 p.
- Collins E.D., Delcul G.D., Hunt R.D., Johnson J.A., Spencer B.B. *Advanced dry head-end reprocessing of light water reactor spent nuclear fuel*. Pat. 8574523 US, no. 2011/0250108, 2013.
- Johnson J.A. *Studies of reaction process for voloxidation methods*: diss. PhD. Knoxville, 2013. 121 p.
- Sawada K., Hirabayashi D., Enokida Y. Conversion of uranium oxide into nitrate with nitrogen dioxide. *J. of Power and Energy Systems*, 2008, vol. 2, no. 2, pp. 557–560.
- Gavrilov P.M., Merkulov I.A., Druz D.V., Bondin V.V., Apalkov G.A., Smirnov S.I., Zhabin A.Yu., Aksyutin P.V. *Sposob okislitel'noy obrabotki (voloksidatsii) obluchennogo yadernogo topliva* [Method of oxidating treatment (voloxidation) of irradiated nuclear fuel]. Patent RF, no. 2654536 RF, 2018.
- Kudryavtsev E.G., Gavrilov P.M., Revenko Yu.A., Merkulov I.A., Bondin V.V., Volk V.I., Bychkov C.I., Alekseenko V.N. *Sposob pererabotki obluchennogo yadernogo topliva* [Method of reprocessing irradiated fuel]. Patent RF, no. 2459299, 2012.
- Rudakov D.A. A new method of nitrogen dioxide production. *Researchgate*, 2018. Available at: www.researchgate.net/publication/325846942 (accessed: 18 January 2021).
- Merkulov I.A., Tikhomirov D.V., Zhabin A.Yu., Apalkov G.A., Smirnov S.I., Aksyutin P.V., Dyachenko A.S., Malysheva V.A. *Sposob okislitel'noy obrabotki (voloksidatsii) obluchennogo yadernogo topliva* [Method of oxidating treatment (voloxidation) of irradiated nuclear fuel]. Patent RF, no. 2619583, 2017.
- Low temperature oxidation of sheared UO_2 fuel: Research report*. Head A.Yu. Zhabin, executor P.V. Aksyutin, A.S. Dyachenko, I.E. Polyakov. Zheleznogorsk, Mining and Chemical Combine publ. 2019. 122 p.
- Annuar N.H.R., Triwahyono S., Jalil A.A. Effect of Cr₂O₃ loading on the properties and cracking activity of Pt/Cr₂O₃-ZrO₂. *Appl. Cat.*, 2017, vol. 541, pp. 77–86.

11. *Nitric acid. Content determination in process solutions with conductometric titration: Enterprise instruction.* Head Padalkin P.A., executor V.N. Bartsev, M.A. Zagladkina. Zheleznogorsk, Mining and Chemical Combine Publ., 2019. 18 p.
12. *Oxalic acid. Content determination in process products: Enterprise instruction.* Head Padalkin P.A., executor Bartsev V.N., Zagladkina M.A. Zheleznogorsk, Mining and Chemical Combine Publ. 2018. 15 p.
13. Matyukha V.A., Matyukha S.V. *Oksalaty redkozemelnykh elementov i aktinidov* [Oxalates of rare earth elements and actinides]. Moscow, Izdat Publ., 2008. 607 p.
14. Ananiev A.V., Tananaev I.G., Shilov V.P. Heterogeneous catalytic redox reactions in the chemistry and technology of the nuclear fuel cycle. *Russian Chemical Reviews*, 2005, vol. 74, no. 11, pp. 1139–1159.
15. Kozhakhina A.V. *Katalizatory dlya oksiditelno-vosstanovitel'nogo vzaimodeystviya oksidov azota i ugleroda (II)*. Diss. Kand. nauk [Catalysts for redox interaction of nitrogen oxides and carbon (II). Cand. Diss.]. Saratov, 2008. 135 p.
16. Apalkov G.A., Smirnov S.I., Zhabin A.Yu. *Sposob kataliticheskoy denitatsii zhidkikh radioaktivnykh otkhodov* [Method for catalytic denitration of liquid radioactive wastes]. Patent RF, no. 2593163, 2016.
17. Schwartz D.S., Tandon L., Martinez P. Morphological comparison of U₃O₈ ore concentrates from Canada Key Lake and Namibia Sources. *Report of Los Alamos national laboratory*, 2016. 25 p.
18. Kang K.H., Na S.H., Song K.C. Oxidation behavior of the simulated fuel with dissolved fission product in air at 573–873 K. *Thermochimica Acta*, 2007, vol. 435, pp. 129–133.
19. Rui L. The study of pre-oxidation and low temperature sintering mechanism to UO_{2+x} pellets. *Adv. Mat. Res.*, 2014, vol. 1053, pp. 80–86.
20. Kulyukhin S.A., Nevolin Yu.M., Gordeev A.V., Bessonov A.A. Gas-phase volume oxidation of uranium mononitride. *Radiochemistry*, 2019, vol. 61, pp. 146–155.

Received: 16 June 2021.

Information about the authors

Pavel V. Aksyutin, engineer-radiochemist, Mining and Chemical Combine.

Anton S. Dyachenko, principal engineer, Mining and Chemical Combine.

Andrey Yu. Zhabin, head of laboratory, Mining and Chemical Combine.

Ivan I. Zherin, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 622.24

КОНТРОЛЬ РЕСУРСА PDC-ПЛАСТИН БУРОВОГО ДОЛОТА

Третьяк Александр Яковлевич¹,
13050465@mail.ru

Сидорова Елена Владимировна¹,
sidorova_ev@npi-tu.ru

Литкевич Юрий Федорович¹,
13050465@mail.ru

Лубянова Светлана Ивановна¹,
13050465@mail.ru

Бурцев Алексей Алексеевич¹,
13050465@mail.ru

Мохов Александр Вадимович²,
mochov@mmbi.krine.ru

¹ Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) им. М.И. Платова, Россия, 346428, г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132.

² Южный научный центр Российской Академии наук, Россия, г. Ростов-на-Дону, ул. Чехова, 42.

Актуальность исследования обусловлена тем, что в настоящее время разведка георесурсов без выполнения буровых работ практически невозможна. Основной объём буровых работ выполняется с использованием долот, армированных PDC-пластинами, которые, помимо этого, широко применяются и при бурении скважин для последующей добычи нефти и газа. Техническое обслуживание долот, базирующееся на своевременном учёте отработки и степени износа, является важным фактором в повышении технико-экономических показателей строительства скважин. Одной из существенных проблем при эксплуатации буровых долот PDC является разное время выхода из строя пластин, приводящее к дополнительным вибрациям и, как следствие, к повышенному нагружению инструмента и поломкам. Кроме того, очевидно, что в таких условиях техническое обслуживание, связанное с восстановлением и заменой пластин, приходится проводить чаще. Обеспечение близкого к равному ресурса режущих пластин бурового долота позволяет увеличивать период эксплуатации и сокращать время технического обслуживания буровых долот, связанного с восстановлением и заменой PDC.

Цель: обеспечение близкого к равному ресурса PDC-пластин бурового долота для повышения производительности геолого-разведочных работ и бурения скважин на нефть и газ.

Объекты: механическое нагружение бурового долота, ресурс PDC-пластин.

Методы: метод конечных элементов, принципы механики сплошных сред, элементы теории износа, методы анализа и синтеза, алгоритмизация.

Результаты. Решение поставленной задачи позволило увеличить период эксплуатации и сократить время технического обслуживания буровых долот, связанного с восстановлением и заменой PDC-пластин, за счёт использования различных по прочности PDC, отличающихся геометрическими или структурными решениями, на базе анализа распределения механических напряжений для всей эксплуатационной гаммы режимов бурения.

Ключевые слова:

Разведка георесурсов, бурение нефтяных и газовых скважин, буровое долото, PDC-пластина, напряжение, ресурс, износ, механическое нагружение, МКЭ.

Введение

В настоящее время разведка георесурсов без выполнения буровых работ практически невозможна. Основной объём буровых работ выполняется с использованием долот, армированных PDC-пластинами, которые, помимо этого, широко применяются и при бурении скважин для последующей добычи нефти и газа.

Техническое обслуживание долот, базирующееся на своевременном учёте отработки и степени износа, является важным фактором в повышении технико-экономических показателей строительства скважин [1].

Одной из существенных проблем при эксплуатации буровых долот PDC является разное время выхода из строя пластин [2], приводящее к дополнительным вибрациям и, как следствие, к повышенному нагружению инструмента, и поломкам [3]. Кроме того, очевидно, что в таких условиях техническое обслуживание, связанное с восстановлением и заменой пластин, приходится проводить чаще [4].

Различное время износа PDC обусловлено неравномерным нагружением долота ввиду его специфической сложной криволинейной формы. Решение проблемы заключается в идентификации степени нагружения пластин при различных режимах бурения раз-

личных видов пород. При этом перераспределить напряжения в пластинах можно за счёт оптимизации пространственной ориентации PDC [5]. Однако разработка конструкций долот с адаптированным положением пластин для всех условий бурения является нецелесообразной. Вторым вариантом решения поставленной задачи может быть контроль режима бурения, обеспечивающего близкое к равномерному распределению нагружения. Такой подход только частично решит поставленную задачу. В качестве третьего, наиболее рационального, решения можно рассмотреть установку PDC различной прочности. В наиболее нагруженных зонах следует устанавливать высокопрочные пластины, а в менее нагруженных – стандартные пластины, стоимость которых существенно не увеличит расходы на эксплуатацию такого долота [6].

Качество PDC-пластин часто определяется процентным содержанием кобальта и размером алмазного зерна [7] или функциональной геометрической формой.

Для анализа и прогнозирования износа пластин разрабатываются различные расчётные модели. Несмотря на достаточно высокую точность в некоторых случаях (например, в [8] максимальная погрешность составляет 15,3 %), применение таких моделей в реальных производственных условиях бывает затруднительным. Требуются менее наукоёмкие, но в то же время учитывающие физико-механические особенности процесса, методы [8].

Среди различных причин износа PDC-пластин основная связана с величиной механических напряжений [9]. На это указывают и разрабатываемые prognostические модели износа [10]. Следует получить информацию о максимальных напряжениях, возникающих в каждой режущей пластине долота для всех комбинаций условий его эксплуатации. Методы численного физико-механического конечно-элементного моделирования позволяют получать такие данные.

После идентификации зон нагружения можно рационализировать установку различных по прочности PDC-пластин на буровом долоте.

На кафедре нефтегазовых техники и технологий Южно-Российского государственного политехнического университета (НПИ) им. М.И. Платова в рамках госконтракта с Фондом содействия инновациям (программа «Старт-1») было разработано двухъярусное долото принципиально нового вида, усовершенствование установки PDC-пластин которого будет рассмотрено.

Таким образом, целью данной работы является обеспечение близкого к равному ресурса режущих пластин PDC бурового долота. Для этого необходимо решить следующие задачи:

- разработать САД-модель двухъярусного долота в конечно-элементной программной среде;
- определить условия эксплуатации долота, выраженные через механические нагружения;
- разработать план имитационных исследований, методику идентификации зон нагружения и алгоритм принятия решений;

- определить механические напряжения, возникающие в каждой режущей пластине долота для всех комбинаций условий его эксплуатации;
- в зависимости от зон нагружения определить виды и расположение PDC-пластин, обеспечивающие близкий к равному ресурс на буровом долоте.

Методика контроля ресурса PDC-пластин бурового долота

Для анализа механического нагружения долота могут использоваться как аналитические методы [11, 12], так и численные [13, 14], в своём большинстве базирующиеся на принципах механики сплошных сред и методе конечных элементов. Ввиду сложности практической аппликации аналитических методов численные представляют больший интерес. В случае неизвестного силового нагружения могут разрабатываться и реологические модели, учитывающие динамическое разрушение породы (например, модель Друкера–Прагера [12] и её реализация в конечно-элементной программной среде SIMULIA/Abaqus Explicit [15]).

3D CAD-модель двухъярусного долота, состоящая из хвостовика, PDC с плоской передней гранью и с конической поверхностью, забуривающей и разбуривающей секцией, была разработана в конечно-элементной программной среде и представлена на рис. 1.

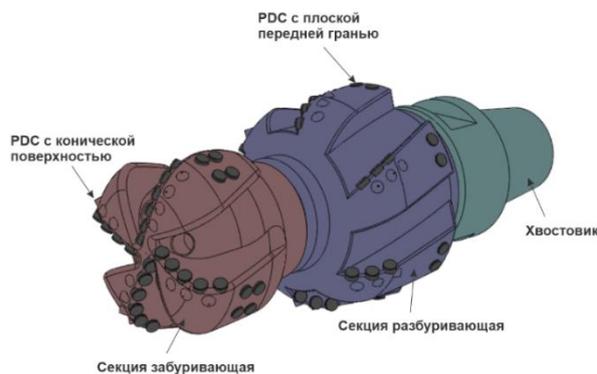


Рис. 1. 3D CAD-модель двухъярусного долота
Fig. 1. Double deck bit 3D CAD-model

На рис. 2, 3 представлено antivибрационное, стабилизирующее двухъярусное долото, разработанное на кафедре нефтегазовых техники и технологий (патент RU № 2740954).

Все PDC с плоской передней гранью были протонированы $n=1.68$ в целях дальнейшей их идентификации при имитационных экспериментах (рис. 4). Расположенные под углом 20° пластины предназначены для разрушения породы, а по окружности – для калибровки инструмента. PDC с конической поверхностью в исследовании не рассматривались.

Корпус бурового долота изготовлен из коррозионностойкой стали 20X17H2, а PDC-пластины – из вольфрамкобальтовой карбидной подложки ВК6 и алмазного слоя PDC в стандартном исполнении. Свойства указанных материалов представлены в табл. 1.

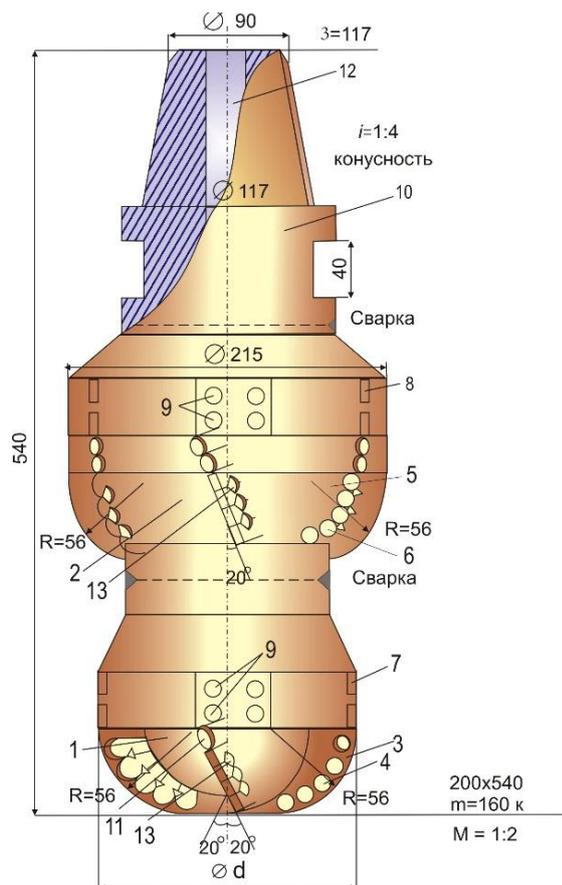


Рис. 2. Антивибрационное, стабилизирующее двухъярусное долото

Fig. 2. Vibration proof double deck bit for stability

При эксплуатации долото подвергается следующим нагрузкам (рис. 4):

- осевой нагрузке F_a (в диапазоне 2000–150000 Н);
 - реакции породы F_c (в диапазоне 500–2000 Н);
 - крутящему моменту T (в диапазоне 6400–9000 Н·м).
- Осевая нагрузка и крутящий момент обусловлены режимом бурения, а реакция породы – прочностью разбуриваемой породы.

В САЕ-модуле конечно-элементной программной среды в нелинейной формулировке создаётся расчётная физико-механическая модель, учитывающая геометрию и материалы бурового долота, а также экс-

плуатационная схема нагружения с учётом граничных условий [16, 17].

В имитационных моделях определяются максимальные значения напряжений по Мизесу. Варьирование значений входных параметров представлено в табл. 2.

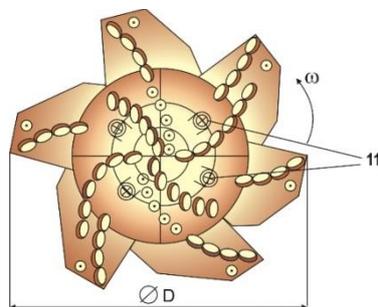


Рис. 3. Антивибрационное, стабилизирующее двухъярусное долото (вид снизу)

Fig. 3. Vibration proof double deck bit for stability (underside view)

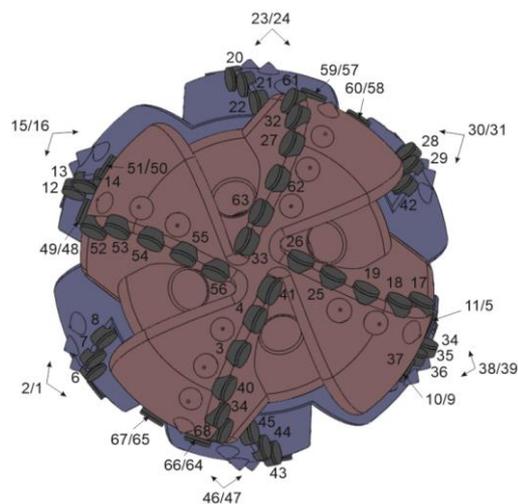


Рис. 4. Нумерация PDC-пластин (вид снизу: нумерация со слешем указывает на пластины верхнего и нижнего ряда забуривающей секции, а со стрелками – на пластины на разбуривающей секции)

Fig. 4. PDC-plates numeration (underside view: numeration with slash points at the plates of top and bottom sets of drilling-in section, numeration with arrows points at the plates of drilling-out section)

Таблица 1. Физико-механические свойства материалов бурового долота [4, 10]

Table 1. Drilling bit materials physical and mechanical properties [4, 10]

| Параметр/Parameter | Единица измерения/Unit | 20X17H2 | BK6 | PDC |
|---|--------------------------------------|---------|----------|----------|
| Модуль Юнга Young modulus | МПа/MPa | 215000 | 579000 | 890000 |
| Коэффициент Пуассона Poisson's ratio | – | 0,28 | 0,22 | 0,07 |
| Модуль сдвига Rigidity modulus | ГПа/GPa | 79000 | 280000 | 545000 |
| Плотность Density | кг/м ³ /kg/m ³ | 7700 | 15000 | 3510 |
| Коэффициент теплового расширения Temperature-expansion coefficient | мм/(мм·°C)/mm/(mm·°C) | 11e-006 | 5,2e-006 | 2,5e-006 |
| Теплопроводность Heat transfer | Дж/(м·с·°C)/J/(m·s·°C) | 14 | 100 | 543 |
| Удельная теплоёмкость Specific heat | Дж/(кг·°C)/J/(kg·°C) | 440 | 230 | 790 |

Таблица 2. Варьирование значений входных параметров
Table 2. Inlet conditions variations

| Параметр Parameter | Минимальное значение Minimum | Шаг Step | Максимальное значение Maximum |
|--|---------------------------------|-------------|----------------------------------|
| Осевая нагрузка F_a , Н Axial stress F_a , N | 2000 | 74000 | 150000 |
| Реакция породы F_c , Н Rock reaction F_c , N | 500 | 750 | 2000 |
| Крутящий момент T , Н·м Rotation moment T , N·m | 6400 | 1300 | 9000 |

Матрица экспериментов представлена в табл. 3.

Алгоритм обработки данных, полученных в ходе серии имитационных испытаний, и идентификации относительной степени нагружения PDC-пластин представлен на рис. 5.

Согласно матрице экспериментов проводятся имитационные испытания, которые позволяют получить сведения о напряжениях по Мизесу в буровом долоте. Формируется банк данных максимальных напряжений в каждой пластине n для соответствующих условий бурения i (осевая нагрузка F_a), j (реакция породы F_c) и k (крутящий момент T) σ_{ijk}^n . По отношению к максимальной нагрузке пластины классифицируются следующим образом: класс нагружения $PDC_{ijk}^n = 3 \geq 66\%$ от максимальной нагрузки, класс нагружения $PDC_{ijk}^n = 2 \geq 33\%$, класс $PDC_{ijk}^n = 1 < 33\%$.

На основании анализа всей совокупности условий эксплуатации каждой пластине присваивается общий класс нагружения: $PDCG_n=3$, если $\Sigma PDC^n/(ijk) > 2$;

$PDCG_n=2$, если $\Sigma PDC^n/(ijk) > 1$; $PDCG_n=1$, если $\Sigma PDC^n/(ijk) \leq 1$.

Таблица 3. Матрица экспериментов
Table 3. Experiments matrix

| Код эксперимента Experiment code | Уровни факторов Factors levels | | | F_a , Н | F_c , Н | T , Н·м |
|-------------------------------------|-----------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | F_a , Н | F_c , Н | T , Н·м | | | |
| X ₁₁₁ | -1 | -1 | -1 | 2000 | 500 | 6400 |
| X ₁₁₂ | -1 | -1 | 0 | 2000 | 500 | 7700 |
| X ₁₁₃ | -1 | -1 | +1 | 2000 | 500 | 9000 |
| X ₁₂₁ | -1 | 0 | -1 | 2000 | 1250 | 6400 |
| X ₁₂₂ | -1 | 0 | 0 | 2000 | 1250 | 7700 |
| X ₁₂₃ | -1 | 0 | +1 | 2000 | 1250 | 9000 |
| X ₁₃₁ | -1 | +1 | -1 | 2000 | 2000 | 6400 |
| X ₁₃₂ | -1 | +1 | 0 | 2000 | 2000 | 7700 |
| X ₁₃₃ | -1 | +1 | +1 | 2000 | 2000 | 9000 |
| X ₂₁₁ | 0 | -1 | -1 | 76000 | 500 | 6400 |
| X ₂₁₂ | 0 | -1 | 0 | 76000 | 500 | 7700 |
| X ₂₁₃ | 0 | -1 | +1 | 76000 | 500 | 9000 |
| X ₂₂₁ | 0 | 0 | -1 | 76000 | 1250 | 6400 |
| X ₂₂₂ | 0 | 0 | 0 | 76000 | 1250 | 7700 |
| X ₂₂₃ | 0 | 0 | +1 | 76000 | 1250 | 9000 |
| X ₂₃₁ | 0 | +1 | -1 | 76000 | 2000 | 6400 |
| X ₂₃₂ | 0 | +1 | 0 | 76000 | 2000 | 7700 |
| X ₂₃₃ | 0 | +1 | +1 | 76000 | 2000 | 9000 |
| X ₃₁₁ | +1 | -1 | -1 | 150000 | 500 | 6400 |
| X ₃₁₂ | +1 | -1 | 0 | 150000 | 500 | 7700 |
| X ₃₁₃ | +1 | -1 | +1 | 150000 | 500 | 9000 |
| X ₃₂₁ | +1 | 0 | -1 | 150000 | 1250 | 6400 |
| X ₃₂₂ | +1 | 0 | 0 | 150000 | 1250 | 7700 |
| X ₃₂₃ | +1 | 0 | +1 | 150000 | 1250 | 9000 |
| X ₃₃₁ | +1 | +1 | -1 | 150000 | 2000 | 6400 |
| X ₃₃₂ | +1 | +1 | 0 | 150000 | 2000 | 7700 |
| X ₃₃₃ | +1 | +1 | +1 | 150000 | 2000 | 9000 |

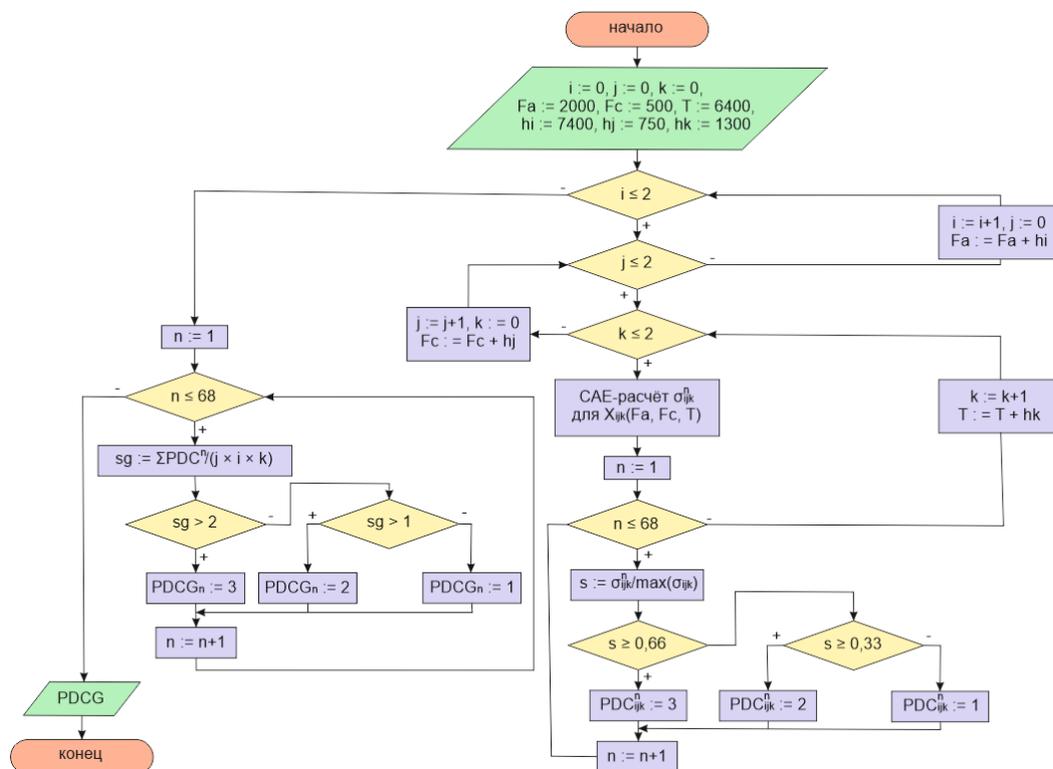


Рис. 5. Алгоритм обработки данных, полученных в ходе серии имитационных испытаний, и идентификации относительной степени нагружения PDC-пластин

Fig. 5. Algorithm for processing data obtained during a series of simulation tests and identifying the relative degree of PDC plates loading

Для оценки относительного ресурса PDC-пластины используется коэффициент износа W_H [2]

$$W_H = K_{1C}^{0,5} \cdot E^{-0,8} \cdot H_K^{1,43},$$

где K_{1C} – вязкость разрушения, МПа·м^{0,5}; E – модуль Юнга, ГПа; H_K – микротвёрдость, ГПа.

Результаты и обсуждение

Исследования позволили идентифицировать значения общего класса нагружения PDC-пластин бурового долота (табл. 4).

Таблица 4. Общий класс нагружения пластин

Table 4. General class of plates loading

| Общий класс нагружения General class of loading | Номера пластин Plates numbers |
|--|--|
| 1 | 1, 2, 5, 9, 10, 11, 15, 16, 23, 24, 30, 31, 38, 39, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 57, 58, 59, 60, 64, 65, 66, 67 |
| 2 | 3, 6, 7, 8, 12, 13, 14, 17, 18, 19, 25, 27, 29, 32, 34, 35, 40, 43, 44, 45, 52, 53, 54, 55, 61, 62, 68 |
| 3 | 4, 22, 26, 28, 33, 36, 37, 41, 42, 56, 63 |

Очевидно, что наименьшим нагрузкам (общий класс нагружения 1) подвержены PDC-пластины, служащие для калибровки и расположенные по окружности. Преимущественным видом износа этих пластин будет истирающий износ. Здесь можно применять стандартные PDC-пластины.

Сопротивление более высоким нагрузкам может решаться за счёт применения высокопрочных структур материалов PDC-пластин или за счёт геометрических решений.

В качестве возможных вариантов материалов PDC-пластин была рассмотрена линейка от Element Six: Syndrill, Syndite и Syndax3.

Таблица 5. Свойства материалов PDC-пластин [18]

Table 5. PDC-plates materials quality [18]

| Свойство Quality | Материалы PDC-пластин Element Six PDC-plates materials Element Six | | |
|---|---|---------|---------|
| | Syndrill | Syndite | Syndax3 |
| K_{1C} , вязкость разрушения, МПа·м ^{0,5} K_{1C} , crack resistance, МПа·м ^{0,5} | 9,8 | 8,8 | 6,9 |
| H_K , микротвёрдость, ГПа H_K , micro-hardness, GPa | 50 | 50 | 50 |
| E , модуль Юнга, ГПа E , Young modulus, GPa | 810 | 776 | 925 |
| W_H , коэффициент износа W_H , coefficient of wear | 3,97 | 3,89 | 2,99 |

Наибольшие нагрузки (общий класс нагружения 3) испытывают пластины, расположенные преимущественно в нижних частях забуривающей и разбуривающей секций. В этом случае необходимо применять пластины с наибольшим коэффициентом износа – Syndrill.

Syndrill представляет собой слой поликристаллических алмазов, синтезированных на подложку из твердого сплава под воздействием давления и высокой температуры, размер алмазных зерен которых колеблется от 20 до 40 мкм, средний размер частиц

твердого сплава 3–6 мкм, а среднее содержание кобальта 13 % [19].

Остальные пластины относятся ко второму классу нагружения. Рациональным является применение Syndax3.

Среди геометрических решений можно рассмотреть формы CDE и 3-RDE или PDC с волнистой передней поверхностью.

CDE представляет собой коническую форму алмазного резца. Такая форма позволяет иным образом распределять напряжения, обеспечивая стойкость до 2,5 раз выше, чем в традиционных цилиндрических пластинах [20]. CDE следует применять для второго класса нагружения.

В 2015 г. китайской компанией Sifangda была предложена концепция 3-RDE с тремя режущими кромками. Лабораторные испытания показали ещё более высокую износостойкость и сопротивление усталости по отношению к классической форме [16].

PDC с волнистой передней поверхностью позволяет перераспределить механическую и тепловую нагрузку в контактной зоне, что является преимуществом по отношению к традиционным PDC [21].

Несмотря на то, что 3-RDE и PDC с волнистой передней поверхностью являются дорогостоящим вариантом, их применение для максимально нагруженных пластин (общий класс нагружения 3) является обоснованным.

Разделение PDC-пластин на три общих класса нагружения является наиболее целесообразным в современных условиях бурения нефтяных скважин. Тем не менее более прецизионная классификация позволит в лучшей степени решить проблему обеспечения близкого к единому ресурса PDC-пластин бурового долота. Обратной стороной повышения точности является увеличение гаммы применяемых пластин, что не всегда экономически обосновано [22].

Заключение

Обеспечение близкого к равному ресурса режущих пластин бурового долота при выполнении разведки георесурсов или бурении нефтяных и газовых скважин возможно за счёт использования различных по прочности PDC, отличающихся геометрическими или структурными решениями, на базе анализа распределения механических напряжений для всей эксплуатационной гаммы режимов бурения. Предложенная методика принятия решения, разработанная исходя из принципа качественной оценки и минимизации наукоёмких операций, тем не менее, имеет под собой обоснованную физико-механическую модель, реализуемую в нелинейной конечно-элементной программной среде. Алгоритм является гибким и может быть адаптирован в зависимости от требований к уровню прецизионности и возможностей увеличения линейки применяемых PDC-пластин.

В дальнейшем представленная модель может быть усовершенствована посредством учёта динамических и вибрационных факторов, а также гидродинамического действия буровых растворов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Методические основы расчета затрат на ремонт долота PDC / А.П. Герасименко, А.А. Искорнев, А.А. Липатников, Е.Г. Леонов // Бурение и нефть. – 2016. – № 12. – С. 44–48.
2. Geometry and force modeling, and mechanical properties study of polycrystalline diamond compact bit under wearing condition based on numerical analysis / Z. Huang, Y. Ma, Q. Li, D. Xie // Advances in Mechanical Engineering. – 2017. – V. 9. – № 6. – 1687814017702080 p.
3. Vibration failure and anti-vibration analysis of an annular-grooved PDC bit / K. Huang, Y. Yang, Y. Liu, Q. Niu // Engineering Failure Analysis. – 2020. – V. 115. – 104658 p.
4. Numerical investigations on the effect of ultra-high cutting speed on the cutting heat and rock-breaking performance of a single cutter / M. Gao, K. Zhang, Q. Zhou, H. Zhou, B. Liu, G. Zheng // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2020. – V. 190. – 107120 p.
5. Abrasion rule of polycrystalline diamond compact bit cutter / J. Wu, S. Zhang, X. Ding, F. Qu, X. Xie // Journal of Failure Analysis and Prevention. – 2019. – V. 19. – № 4. – P. 1135–1143.
6. Методика управления процессом бурения и экспериментальные исследования сил сопротивления при бурении долотами с резцами PDC / В.В. Нескоромных, М.С. Попова, А.Е. Головаченко, В.Г. Плетнев, Л. Баочанг // Записки Горного института. – 2020. – Т. 246. – С. 539–546.
7. A study on PDC drill bits quality / M. Yahiaoui, L. Gerbaud, J.Y. Paris, J. Denape, A. Dourfaye // Wear. – 2013. – V. 298. – P. 32–41.
8. Wang C., Li S., Zhang L. Evaluation of rock abrasiveness class based on the wear mechanisms of PDC cutters // Journal of Petroleum Science And Engineering. – 2019. – V. 174. – P. 959–967.
9. Abbas R.K. A review on the wear of oil drill bits (conventional and the state of the art approaches for wear reduction and quantification) // Engineering Failure Analysis. – 2018. – V. 90. – P. 554–584.
10. Investigation on the effect of changing rotary speed and weight bit on PCD cutter wear / A.M. Abdul-Rani, K. Ibrahim, A.H. Ab Adzis, B.T. Maulianda, M.M. Asri // Journal of Petroleum Exploration and Production Technology. – 2020. – V. 10. – P. 1063–1068.
11. Li W., Ling X., Pu H. Development of a cutting force model for a single PDC cutter based on the rock stress state // Rock Mechanics and Rock Engineering. – 2020. – V. 53. – № 1. – P. 185–200.
12. Mestat P. Loi de Drucker-Prager // Revue française de génie civil. – 1997. – V. 1. – № 2. – P. 367–371.
13. Simulation and experimental study on temperature and stress field of full-sized PDC bits in rock breaking process / Z. Zhang, D. Zhao, Y. Zhao, Y. Zhou, Q. Tang, J. Han // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2020. – V. 186. – P. 106679.
14. Three-dimensional simulation of rock breaking efficiency under various impact drilling loads / Y. Yang, H. Liao, J. Niu, Z. Wang, J. Chen // Arabian Journal of Geosciences. – 2020. – V. 13. – P. 1–6.
15. Mechanism and numerical analysis of cutting rock and soil by TBM cutting tools / G. Li, W. Wang, Z. Jing, L. Zuo, F. Wang, Z. Wei // Tunnelling and Underground Space Technology. – 2018. – V. 81. – P. 428–437.
16. 3D numerical simulation of rock cutting of an innovative non-planar face PDC cutter and experimental verification / J. Liu, H. Zheng, Y. Kuang, H. Xie, C. Qin // Applied Sciences. – 2019. – V. 9. – № 20. – 4372 p.
17. Analytical modelling of rock cutting force and failure surface in linear cutting test by single PDC cutter / Z. Cheng, G. Li, Z. Huang, M. Sheng, X. Wu, J. Yang // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2019. – V. 177. – P. 306–316.
18. Dubrovinskaia N., Dub S., Dubrovinsky L. Superior wear resistance of aggregated diamond nanorods // Nano letters. – 2006. – V. 6. – № 4. – P. 824–826.
19. Износостойкость PCD режущих элементов, применяемых для комплектации PDC буровых долот / Р.Ю. Куфтырев, Н.И. Полушин, О.С. Котельникова, А.И. Лаптев, М.Н. Сорокин // Известия высших учебных заведений. Черная Металлургия. – 2017. – Т. 60 (9). – С. 745–751.
20. Zhang L. Development of the new type conical teeth of PDC drill bit // Advances in Petroleum Exploration and Development. – 2019. – V. 17. – № 1. – P. 79–84.
21. 3D numerical simulation study of rock breaking of the wavy PDC cutter and field verification / Z. Zhang, D. Zhao, Y. Zhao, K. Gao, C. Zhang, X. Lü // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2021. – V. 203. – P. 108578.
22. Инновационные подходы к конструированию высокоэффективного породоразрушающего инструмента / А.Я. Третьяк, В.В. Попов, А.Н. Гроссу, К.А. Борисов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2017. – № 8. – С. 225–230.

Поступила 16.06.2021 г.

Информация об авторах

Третьяк А.Я., доктор технических наук, заведующий кафедрой нефтегазовых техники и технологий Южно-Российского государственного политехнического университета (НПИ) им. М.И. Платова.

Сидорова Е.В., кандидат технических наук, доцент кафедры нефтегазовых техники и технологий Южно-Российского государственного политехнического университета (НПИ) им. М.И. Платова.

Литкевич Ю.Ф., кандидат технических наук, доцент кафедры нефтегазовых техники и технологий Южно-Российского государственного политехнического университета (НПИ) им. М.И. Платова.

Лубянова С.И., старший преподаватель кафедры нефтегазовых техники и технологий Южно-Российского государственного политехнического университета (НПИ) имени М.И. Платова.

Бурицев А.А., доктор геолого-минералогических наук, доцент кафедры прикладной геологии Южно-Российского государственного политехнического университета (НПИ) им. М.И. Платова.

Мохов А.В., доктор технических наук, ведущий научный сотрудник Федерального исследовательского центра Южного научного центра Российской Академии наук.

UDC 622.24

DRILLING BIT PDC PLATES LIFETIME CONTROL

Aleksandr Ya. Tretyak¹,
13050465@mail.ru

Elena V. Sidorova¹,
sidorova_ev@npi-tu.ru

Yuriy F. Litkevich¹,
13050465@mail.ru

Svetlana I. Lubianova¹,
13050465@mail.ru

Aleksey A. Burtsev¹,
13050465@mail.ru

Aleksandr V. Mokhov²,
mochov@mmbi.krine.ru

¹ Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI),
132, Prosvesheniya street, Novocherkassk, 346428, Russia.

² Federal Research Centre of the Southern Scientific Center of the Russian Academy of Sciences,
42, Chekhov street, Rostov-on-Don, Russia.

The relevance of the research is caused by the fact that nowadays it will be impossible to explore the georesources if we don't provide the drilling operations. A great part of the drilling operation is provided with the aid of PDC-bits that beyond that are used for drilling for oil and gas follow-up production. Drilling bits maintenance support that is based on the timely drilling bit wear degree metering is an important well construction technical-and-economic values improving factor. One of the major problems in drilling bits operation is that the plates fail at different times that drives up the additional pulsation and as a result the increased boring tool load and bit breakages. Additionally it is obvious that under such conditions you have to service, restore and replace drilling bit platens more often. Near-equivalent drilling bit cutting plates lifetime providing makes it possible to extend the drilling bits operational life and cut the time for drilling bits maintenance operation due to PDC reconstruction and replacer.

The main aim of the research is the near-equivalent drilling bit cutting plates lifetime providing for oil and gas exploration and oil-and-gas wells drilling productivity elevation.

Objects of the research are the drilling bit loading, PDC plates lifetime.

Methods: finite-element technique, continuum mechanics principle, abrasion theory elements, analysis-and-synthesis methods, algorithmization.

Results. Achieving of the goal made it possible to extend the drilling bits operational life and cut its maintenance operation time through using the PDC of varying strength that are different in geometrical solutions or architectural decisions on the basis of the stress distribution analysis for all the drilling regimes.

Key words:

Georesources exploring, oil-and-gas wells drilling, drilling bit, PDC-plate, stress, lifetime, wear, loading, finite-element technique.

REFERENCES

1. Gerasimenko P., Iskornev A.A., Lipatnikov A.A., Leonov E.G. The methodology of the calculation of cost for PDC drilling bit reparation. *Drilling and Oil*, 2016, no. 12, pp. 44–48. In Rus.
2. Huang Z., Ma Y., Li Q., Xie D. Geometry and force modeling, and mechanical properties study of polycrystalline diamond compact bit under wearing condition based on numerical analysis. *Advances in Mechanical Engineering*, 2017, vol. 9, no. 6, pp. 1687814017702080.
3. Huang K., Yang Y., Liu Y., Niu Q. Vibration failure and anti-vibration analysis of an annular-grooved PDC bit. *Engineering Failure Analysis*, 2020, vol. 115, pp. 104658.
4. Gao M., Zhang K., Zhou Q., Zhou H., Liu B., Zheng G. Numerical investigations on the effect of ultra-high cutting speed on the cutting heat and rock-breaking performance of a single cutter. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2020, vol. 190, pp. 107120.
5. Wu J., Zhang S., Ding X., Qu F., Xie X. Abrasion rule of polycrystalline diamond compact bit cutter. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 2019, vol. 19, no. 4, pp. 1135–1143.
6. Neskromnyh V.V., Popova M.S., Golovchenko A.E., Pletnev V.G., Baochang L. Methods of drilling process management and experimental investigation of the resistance force during drilling by PDC bits. *Notes of the Mining Institute*, 2020, vol. 246, pp. 539–546. In Rus.
7. Yahiaoui M., Gerbaud L., Paris J.Y., Denape J., Dourfaye A.A. A study on PDC drill bits quality. *Wear*, 2013, no. 298, pp. 32–41.
8. Wang C., Li S., Zhang L. Evaluation of rock abrasiveness class based on the wear mechanisms of PDC cutters. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2019, no. 174, pp. 959–967.
9. Abbas R.K. A review on the wear of oil drill bits (conventional and the state of the art approaches for wear reduction and quantification). *Engineering Failure Analysis*, 2018, no. 90, pp. 554–584.
10. Abdul-Rani A.M., Ibrahim K., Ab Adzis A.H., Maulianda B.T., Asri M.M. Investigation on the effect of changing rotary speed and weight bit on PCD cutter wear. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 2020, vol. 10, pp. 1063–1068.
11. Li W., Ling X., Pu H. Development of a cutting force model for a single PDC cutter based on the rock stress state. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2020, vol. 53, no. 1, pp. 185–200.
12. Mestat P. Loi de Drucker-Prager [Drucker-Prager law]. *Revue française de génie civil*, 1997, vol. 1, no. 2, pp. 367–371.
13. Zhang Z., Zhao D., Zhao Y., Zhou Y., Tang Q., Han J. Simulation and experimental study on temperature and stress field of full-

- sized PDC bits in rock breaking process. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2020, vol. 186, pp. 106679.
14. Yang Y., Liao H., Niu J., Wang Z., Chen J. Three-dimensional simulation of rock breaking efficiency under various impact drilling loads. *Arabian Journal of Geosciences*, 2020, vol. 13, pp. 1–6.
 15. Li G., Wang W., Jing Z., Zuo L., Wang F., Wei Z. Mechanism and numerical analysis of cutting rock and soil by TBM cutting tools. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2018, no. 81, pp. 428–437.
 16. Liu J., Zheng H., Kuang Y., Xie H., Qin C. 3D numerical simulation of rock cutting of an innovative non-planar face pdc cutter and experimental verification. *Applied Sciences*, 2019, vol. 9, no. 20, pp. 4372.
 17. Cheng Z. Analytical modelling of rock cutting force and failure surface in linear cutting test by single PDC cutter. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2019, vol. 177, pp. 306–316.
 18. Dubrovinskaja N., Dub S., Dubrovinsky L. Superior wear resistance of aggregated diamond nanorods. *Nano letters*, 2006, vol. 6, no. 4, pp. 824–826.
 19. Kuftyrev R.Yu., Polushin N.I., Kotelnikova O.S., Laptev A.I., Sorokin M.N. The wear resistance of the PDC cutters that are used for PDC drilling bits configuration. *Proceedings of higher educational institutions. Ferrous metallurgy*, 2017, vol. 60 (9), pp. 745–751. In Rus.
 20. Zhang L. Development of the new type conical teeth of PDC drill bit. *Advances in Petroleum Exploration and Development*, 2019, vol. 17, no. 1, pp. 79–84.
 21. Zhang Z., Zhao D., Zhao Y., Gao K., Zhang C., Lü X. 3D numerical simulation study of rock breaking of the wavy PDC cutter and field verification. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2021, vol. 203, p. 108578.
 22. Tretyak A.Ya., Popov V.V., Grossu A.N., Borisov K.A. Innovative approaches to the design of a highly efficient rock cutting tool. *Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal)*, 2017, no. 8, pp. 225–230. In Rus.

Received: 16 June 2021.

Information about the authors

Aleksandr Ya. Tretyak, Dr. Sc., professor, Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI).

Elena V. Sidorova, Cand. Sc., associate professor, Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI).

Yuriy F. Litkevich, Cand. Sc., associate professor, Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI).

Svetlana I. Lubianova, senior lecturer, Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI).

Aleksey A. Burtsev, Dr. Sc., associate professor, Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI).

Aleksandr V. Mokhov, Dr. Sc., main scientific researcher, Federal Research Centre of the Southern Scientific Center of the Russian Academy of Sciences.

УДК 622.276.53

УРАВНОВЕШЕННОСТЬ УСТАНОВОК СКВАЖИННЫХ ШТАНГОВЫХ НАСОСОВ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ВАТТМЕТРОГРАММ

Яшин Антон Николаевич¹,
yashin.anton.2012@mail.ru

Хакимьянов Марат Ильгизович¹,
hakimyanovmi@gmail.com

¹ Уфимский государственный нефтяной технический университет,
Россия, 450064, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1.

Актуальность. Значительная часть фонда нефтедобывающих скважин нашей страны эксплуатируется установками скважинных штанговых насосов. В качестве приводов установок скважинных штанговых насосов используются низкоскоростные асинхронные электродвигатели с повышенным пусковым моментом. Электродвигатели таких установок работают в недогруженном по мощности режиме с циклически изменяющейся нагрузкой. Такие режимы отрицательно влияют как на работу самих электродвигателей, так и на электрическую сеть. Ухудшаются энергетические характеристики двигателей, такие как коэффициент полезного действия и коэффициент мощности. Балансировка установок скважинных штанговых насосов путем регулирования грузов противовесов позволяет сделать нагрузку более равномерной, улучшив режимы работы приводов и снизив расход электроэнергии. Однако оценить сбалансированность работающих установок достаточно сложно, так как скважины обычно не оборудованы датчиками для измерения ваттметрограмм и оценки сбалансированности. На месторождениях часто балансировку проводят при помощи обычных мультиметров с токовыми клещами. Поэтому важно оценить влияние сбалансированности насосных установок скважин действующего фонда на потери электроэнергии.

Цель: исследовать скважинные насосные установки действующего фонда с точки зрения сбалансированности; определить, какая часть фонда скважинных насосных установок является сбалансированной, какой коэффициент неуравновешенности имеют другие скважины; оценить влияние сбалансированности установок скважинных штанговых насосов на потребление электроэнергии; сделать выводы о перерасходе потребления электроэнергии в результате недостаточной сбалансированности.

Объекты: нефтедобывающие скважины, скважинные штанговые насосные установки, асинхронные электроприводы.

Методы: статистический анализ ваттметрограмм; математические методы анализа ваттметрограмм с определением среднего значения потребляемой мощности, коэффициента неуравновешенности, потенциала энергосбережения.

Результаты. Установлено, что сбалансированными можно считать только 2 % скважинных насосных установок. При этом 35 % скважинных насосных установок имеют коэффициент неуравновешенности хуже 0,5. Показано отрицательное влияние недостаточной балансировки установок скважинных штанговых насосов на потребление электроэнергии. В результате доуравновешивания энергопотребление приводов скважинных насосов может быть снижено более чем в 2 раза при сохранении объемов добычи.

Ключевые слова:

Нефтедобывающая скважина, установка скважинного штангового насоса, асинхронный электропривод, ваттметрограмма, балансировка, энергопотребление.

Введение

Энергоэффективность технологических процессов является важным фактором конкурентоспособности для всех промышленных предприятий [1, 2]. Организации проводят энергетический аудит своих технологических процессов, после которого разрабатывают меры по повышению эффективности своих производств.

Нефтедобывающие предприятия уделяют вопросам энергоэффективности особое внимание, так как цены на их продукцию – углеводородное сырье – в последнее десятилетие стабильно снижаются. В то же время затраты на добычу постоянно увеличиваются из-за роста цен на электроэнергию, удорожания оборудования, повышения уровня оплаты труда.

Снижению цен на углеводородное сырье способствует глобальное развитие возобновляемой энергетики, бурный рост количества электромобилей, ужесточение экологических стандартов [3, 4]. Двигатели внутреннего сгорания автомобилей, транспортных

средств и другие промышленные установки становятся более экономичными, что также способствует снижению мировых потребностей в нефти и нефтепродуктах.

Однако, по нашему мнению, наша страна в силу климатических особенностей не сможет полностью отказаться от углеводородного сырья, хотя доля энергии, вырабатываемой возобновляемыми источниками, будет увеличиваться. Поэтому нефтяникам важно будет минимизировать себестоимость добычи нефти, сократив, в первую очередь, расход электроэнергии [5].

Самыми энергоемкими потребителями на нефтепромыслах являются электроприводы нефтедобывающих скважинных насосов, которые хоть и имеют сравнительно небольшие мощности, но в большом количестве рассредоточены на обширных территориях. Также существенный вклад в энергопотребление вносят системы поддержания пластового давления, промысловой подготовки и трубопроводного транспорта нефти и газа.

Основными типами скважинных насосов для добычи нефти являются электроцентробежные погружные насосы, скважинные штанговые насосы и винтовые насосы. Остальные типы скважинных насосов (вибрационные, инжекторные, мембранные) используются значительно реже и не вносят существенного вклада в энергопотребление.

Скважинные штанговые насосы (СШН) являются основным способом механизированной эксплуатации скважин во многих странах (США, Канада) и многих нефтяных компаниях (ПАО «Татнефть»). В нашей стране установки СШН являются одним из основных типов скважинных насосов, уступая лишь установкам электроцентробежных погружных насосов по количеству эксплуатируемых скважин и объемам добываемой нефти.

Работа электроприводов установок СШН имеет ряд особенностей. Электроприводы СШН работают с переменной циклически изменяющейся нагрузкой при мощностях ниже номинальных, что отрицательно влияет на коэффициент мощности сети и коэффициент полезного действия самого двигателя. Из-за необходимости обеспечения высокого момента при пуске насосной установки, особенно в зимнее время, СШН комплектуются электродвигателями заведомо большей мощности и во время работы оказываются в значительной степени недогруженными.

Улучшить режим работы электропривода СШН позволяет его уравновешивание, которое проводится на основе ваттметрограмм – графиков активной мощности, потребляемой электродвигателем [6–10].

Поэтому проблема повышения сбалансированности (или уравновешивания) установок СШН является актуальной для нефтегазодобывающих предприятий.

Установка скважинного штангового насоса

Схема установки СШН показана на рис. 1. Установка СШН состоит из погружной и наземной частей. Погружная часть содержит фильтр, скважинный штанговый глубинный насос, колонну насосно-компрессорных труб и колонну насосных штанг. Наземная часть включает в себя следующее оборудование: устьевая арматура, устьевой сальник, полированный шток, стойка, траверсы канатной подвески, головка балансира, фундамент, канатная подвеска, балансир, шатун, кривошип, редуктор, шкив, клиноременная передача, электродвигатель, балансировочные грузы, рама, тормоз, станция управления и трансформатор.

Кривошипно-шатунный механизм установки СШН преобразует вращение вала электродвигателя, передаваемое через редуктор, в возвратно-поступательное движение полированного штока и соединенной с ним колонны насосных штанг [11, 12]. Если принять скорость вращения вала электродвигателя постоянной, то движение точки подвеса штанг происходит по закону, близкому к гармоническому. Но так как для привода используются асинхронные электродвигатели, а нагрузка циклически изменяется, перемещение точки подвеса штанг будет отличаться от гармонического закона. Для привода установок СШН в боль-

шинстве случаев используются асинхронные электродвигатели с повышенным пусковым моментом напряжением 0,4 кВ с синхронной скоростью вращения 500; 750; 1000 либо 1500 об/мин мощностью 22–37 кВт. Широко используются электродвигатели серий 4А, 5А, АИР и другие.

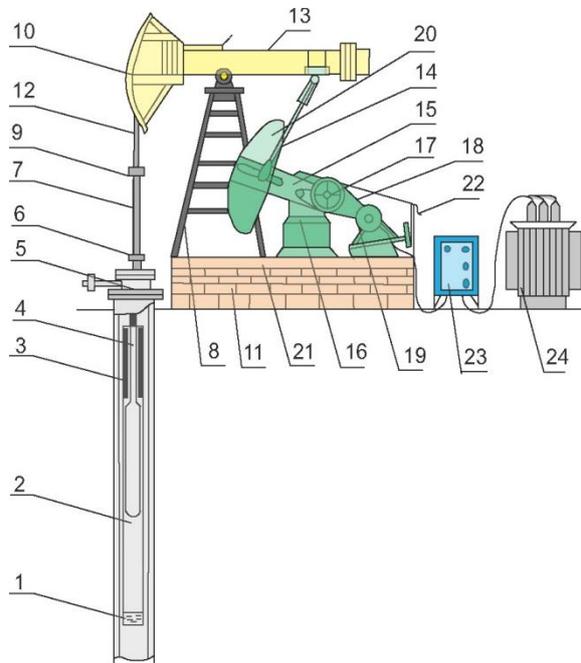


Рис. 1. Оборудование установки штангового глубинного насоса: 1 – фильтр, 2 – скважинный насос, 3 – насосно-компрессорные трубы, 4 – насосные штанги, 5 – оборудование устья, 6 – устьевой сальник, 7 – полированный шток, 8 – стойка, 9 – траверсы канатной подвески, 10 – головка балансира, 11 – фундамент, 12 – канатная подвеска, 13 – балансир, 14 – шатун, 15 – кривошип, 16 – редуктор, 17 – шкив, 18 – клиноременная передача, 19 – электродвигатель, 20 – балансировочный груз, 21 – рама, 22 – тормоз, 23 – станция управления, 24 – трансформатор

Fig. 1. Sucker rod pumping unit equipment: 1 – filter, 2 – well pump, 3 – tubing, 4 – sucker rods, 5 – wellhead equipment, 6 – wellhead stuffing box, 7 – polished rod, 8 – stand, 9 – traverse rope suspension, 10 – balancer head, 11 – foundation, 12 – rope suspension, 13 – balancer, 14 – connecting rod, 15 – crank, 16 – gearbox, 17 – pulley, 18 – V-belt transmission, 19 – electric motor, 20 – balancing weight, 21 – frame, 22 – brake, 23 – control station, 24 – transformer

Также для приводов установок СШН разрабатываются специальные типы электродвигателей, например, вентильные. Вентильные двигатели могут работать на низких скоростях вращения (до 200 об/мин и ниже), что позволяет их устанавливать прямо на входном валу редуктора. При этом из схемы насосной установки исключается ременная передача и, соответственно, исчезают проблемы с обрывом ремней. Однако в силу высокой стоимости вентильные приводы пока не получили распространения на установках СШН.

Уравновешивание установок скважинных штанговых насосов

При отсутствии уравновешивания электропривод установки СШН будет работать в двигательном режиме при подъеме колонны штанг вместе со скважинной жидкостью и будет переходить в генераторный режим во время спуска. С целью сделать нагружение более равномерным в конструкцию насосных установок добавлены балансировочные грузы.

Следует отметить, что кинематика установок СШН такова, что во время опускания колонны штанг происходит подъем балансировочных грузов с накоплением в них потенциальной энергии. Затем во время подъема колонны штанг происходит опускание балансировочных грузов. Таким образом, балансировочные грузы догружают электродвигатель во время опускания колонны штанг и разгружают его во время подъема колонны штанг и скважинной жидкости [13]. Процесс перемещения грузов называется уравновешиванием, или балансировкой, установки СШН. Однако полностью сгладить нагрузку уравновешивание неспособно, оно позволяет лишь исключить переход электродвигателя в генераторный режим и обеспечить равенство максимальных значений потребляемой мощности на отрезках времени, соответствующих подъему и спуску штанговой колонны.

График потребляемой электродвигателем установкой СШН активной мощности за один или несколько циклов качания называется ваттметрограммой. Ваттметрограммы являются эффективным и распространенным способом мониторинга скважинных насосных установок. Ваттметрограммы позволяют диагностировать целый ряд неисправностей наземного и погружного оборудования, таких как дефекты редуктора, подшипников станка-качалки, обрывы ремней, штанг и недостаточную уравновешенность насосной установки [14–16]. Из массива ваттметрограммы путем математической обработки может быть получен массив динамограммы, а анализ динамограммы позволяет диагностировать целый ряд неисправностей погружного оборудования: утечки во всасывающем и нагнетательном клапанах, запарафинивание насоса, неполное заполнение цилиндра насоса жидкостью, влияние пластового газа, срыв подачи, искривление цилиндра насоса, слишком низкая или слишком высокая посадка плунжера, выход плунжера из насоса и другие.

При уравновешивании стараются обеспечить равенство максимальных значений активной мощности, потребляемой электродвигателем, при подъеме (P_1) и спуске (P_2) колонны штанг (рис. 2).

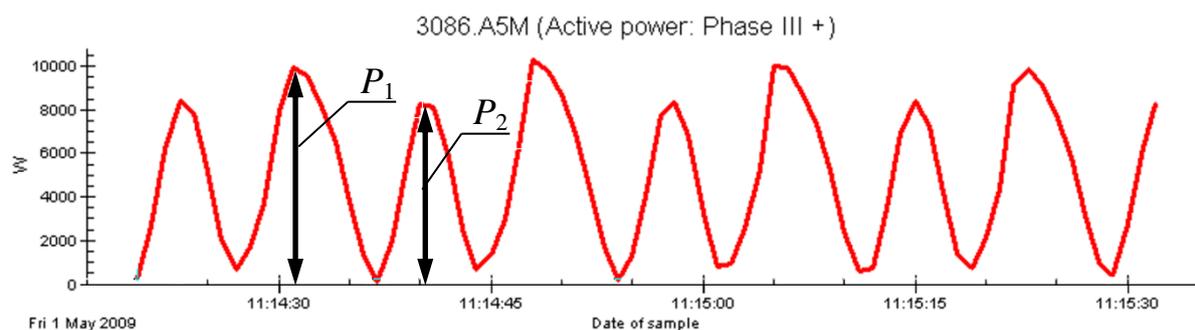


Рис. 2. Ваттметрограмма установки скважинного штангового насоса: P_1 – максимальная потребляемая активная мощность при подъеме колонны штанг; P_2 – максимальная потребляемая активная мощность при спуске колонны штанг

Fig. 2. Wattmeter card of the sucker rod pump unit: P_1 – maximum consumed active power when lifting the rod string; P_2 – maximum consumed active power when lowering the rod string

Уровень сбалансированности установки СШН оценивают при помощи коэффициента неуравновешенности, который определяется следующим образом [17]:

$$k = \frac{P_1 - P_2}{P_1 + P_2}.$$

На практике часто уравновешивание установок СШН проводят по значениям тока [18]:

$$k_i = \frac{I_1 - I_2}{I_1 + I_2},$$

где I_1 – максимальный ток при подъеме колонны штанг, А; I_2 – максимальный ток при спуске колонны штанг, А.

Уравновешивание по току проводят по той причине, что у операторов на промысле часто отсутству-

ют приборы для измерения ваттметрограмм, а есть только мультиметры с токовыми клещами. Однако ток в течение цикла качания установки СШН изменяется значительно меньше, чем активная мощность (рис. 3), поэтому произвести качественную балансировку по току очень сложно [19]. Из представленных на рис. 3 синхронизированных токограммы и ваттметрограммы видно, что ток изменяется за цикл качания от 22,8 до 25,6 А (на 11%), в то время как активная мощность изменяется с 1040 до 8009 Вт (на 87%). Таким образом, балансировка установки СШН по значениям активной мощности будет значительно точнее, чем балансировка по значениям тока [20].

Наиболее правильно было бы производить уравновешивание не по максимальным значениям токов или мощности, а по энергии, затрачиваемой при подъеме и спуске колонны штанг, то есть по интегралам активной мощности за время подъема и спуска:

$$k_w = \frac{\int_{T_1} p dt - \int_{T_2} p dt}{\int_{T_1} p dt + \int_{T_2} p dt},$$

где p – мгновенное значение активной мощности, Вт; T_1 – время подъема колонны штанг, с; T_2 – время спуска колонны штанг, с.

Однако уравновешивание по энергии практически не используется, так как требует наличия специальных приборов, подключенных к измерительным трансформаторам тока, напряжения и датчику положения, определяющему начало хода вверх и вниз. Такие приборы могут быть интегрированы в состав ин-

теллектуальных станций управления, но их количество пока очень мало [21–24].

Также можно делать оценку сбалансированности сравнивая длительности хода колонны штанг вверх и вниз (и скорости движения вверх и вниз). Так как скорость вращения асинхронных двигателей уменьшается с ростом момента на рабочем участке характеристики, то и время движения будет различным. Однако для реализации таких способов необходима точная фиксация моментов прохождения штоком нижней и верхней мертвых точек. На практике станции управления часто не имеют датчиков положения либо имеют один датчик, фиксирующий прохождение только нижней мертвой точки.

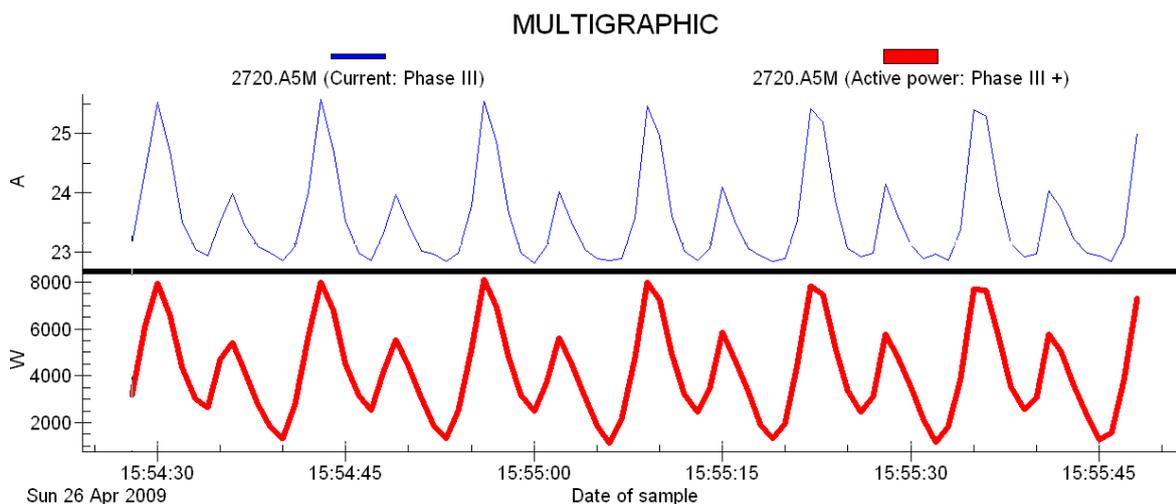


Рис. 3. Синхронизированные по времени токограмма и ваттметрограмма
 Fig. 3. Time-synchronized current card and wattmeter card

Установлено, что недостаточная уравновешенность установок СШН приводит к дополнительным потерям мощности [25]. На рис. 4 приводится диа-

грамма, устанавливающая связь между коэффициентом неуравновешенности k и непроизводительным перерасходом мощности.

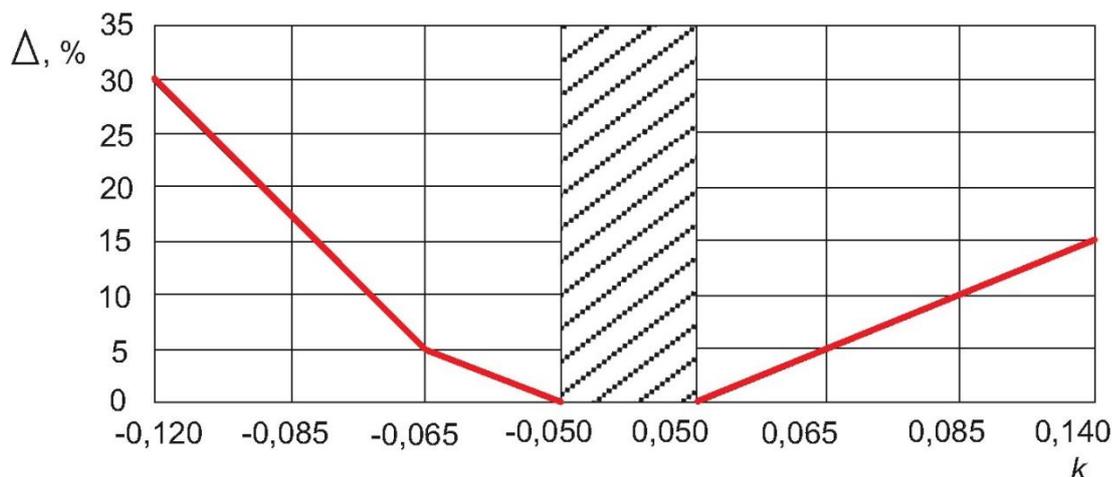


Рис. 4. Зависимость перерасхода мощности от коэффициента неуравновешенности установки скважинного штангового насоса [25]
 Fig. 4. Dependence of power losses on the unbalance factor of the sucker rod pump unit [25]

Как видно из рис. 4, неуравновешенность значительно увеличивает потребление мощности насосной установки. Так, при коэффициенте неуравновешенности $k=0,14$ перерасход мощности составит до 15 %, а

при $k=-0,12$ перерасход мощности увеличится до 30 %. Если на СШН установлены слишком большие грузы (двигатель потребляет при подъеме штанговой колонны мощность меньше, чем при спуске), то ко-

эффицент неуравновешенности принимает отрицательные значения. При этом потери мощности почти в два раза превышают потери при положительном значении коэффициента неуравновешенности.

Если коэффициент неуравновешенности находится в пределах от минус 0,05 до +0,05, то насосная установка считается уравновешенной. И дополнительные потери мощности в этом случае можно не учитывать [26–28].

Анализ практических ваттметрограмм

Авторами был проведен анализ ваттметрограмм более чем 50 скважин месторождений Западной Сибири, эксплуатируемых СШН. При этом ставилась задача оценить общий уровень сбалансированности насосных установок, а также возможный эффект энергосбережения, который может быть получен в результате их уравновешивания.

Для каждой ваттметрограммы определялись максимальные значения активной мощности при подъеме и спуске колонны штанг, на основе которых вычислялись коэффициенты неуравновешенности. Затем были найдены доли скважин, соответствующих определенным диапазонам коэффициента неуравновешенности.

Результаты проведенного исследования сбалансированности скважин, эксплуатируемых СШН, приведены в табл. 1.

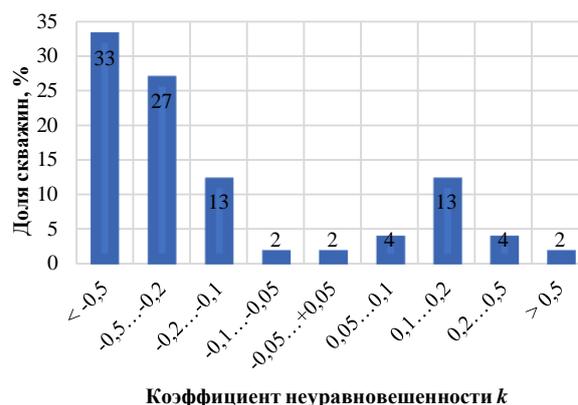
На рис. 5 приведена диаграмма уравновешенности фонда скважин. Как видно из диаграммы, сбалансированными можно считать лишь 2 % скважин, имеющих коэффициент неуравновешенности от минус 0,05 до +0,05.

33 % скважин работает с коэффициентом неуравновешенности от минус 1,0 до минус 0,5; 27 % – от минус 0,5 до минус 0,2; 13 % – от минус 0,2 до минус 0,1; 2 % – от минус 0,1 до минус 0,05. 4 % скважин работает с коэффициентом неуравновешенности от 0,05 до 0,1; 13 % – от 0,1 до 0,2; 4 % – от 0,2 до 0,5 и 2 % – от 0,5 до 1,0.

Таблица 1. Результаты исследования сбалансированности скважин

Table 1. Results of the study of well balance

| Диапазон коэффициента неуравновешенности Range of imbalance coefficient | Доля скважин, % Part of wells, % |
|--|-------------------------------------|
| -1,0...-0,5 | 33 |
| -0,5...0,2 | 27 |
| -0,2...0,1 | 13 |
| -0,1...0,05 | 2 |
| -0,05...0,05 | 2 |
| 0,05...0,1 | 4 |
| 0,1...0,2 | 13 |
| 0,2...0,5 | 4 |
| 0,5...1,0 | 2 |



Коэффициент неуравновешенности k

Рис. 5. Диаграмма уравновешенности фонда скважин

Fig. 5. Diagram of well balance

При этом было зафиксировано минимальное отрицательное значение коэффициента неуравновешенности $k=-0,85$, а максимальное положительное значение $k=0,74$. Ваттметрограммы скважин с коэффициентами неуравновешенности $k=-0,85$ и $k=0,74$ приведены на рис. 6, 7 соответственно.

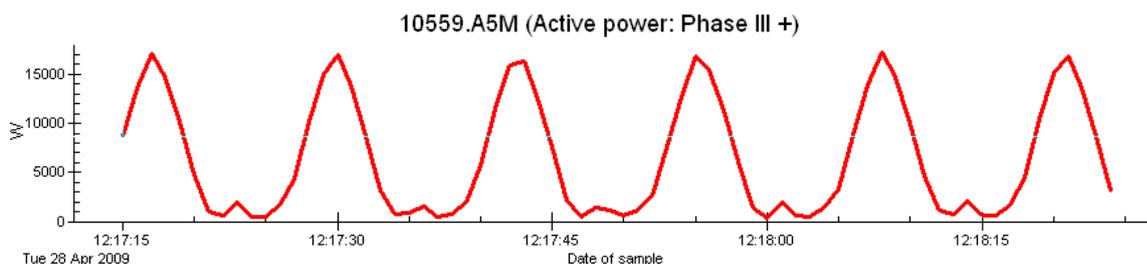


Рис. 6. Ваттметрограмма с коэффициентом неуравновешенности $k=-0,85$

Fig. 6. Wattmeter card with the imbalance coefficient $k=-0,85$

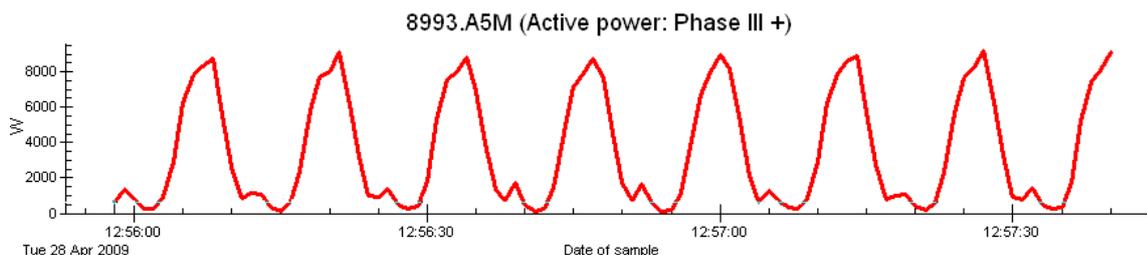


Рис. 7. Ваттметрограмма с коэффициентом неуравновешенности $k=0,74$

Fig. 7. Wattmeter card with the imbalance coefficient $k=0,74$

Как видно из рис. 6, 7, при таких больших значениях коэффициента неуравновешенности на ваттметрограммах исчезает один из пиков потребления мощности за каждый цикл качания. Это приводит к тому, что двигатель половину цикла качания работает недогруженным в режиме, близком к холостому ходу. При еще большей разбалансированности двигатель может переходить в генераторный режим. А другую половину периода наблюдается повышенное потребление электроэнергии.

75 % скважин имеют отрицательный коэффициент неуравновешенности, то есть мощность, потребляемая электродвигателем на подъем колонны штанг и скважинной жидкости, меньше, чем мощность, потребляемая на подъем уравновешивающих грузов. При этом потери выше, чем при таком же по модулю, но положительном значении коэффициента неуравновешенности.

Работа электродвигателя в режиме с резкопеременной циклически изменяющейся нагрузкой вызывает ухудшение энергетических показателей, таких как КПД и коэффициент мощности $\cos \phi$. Это отрицательно влияет на электрическую сеть.

Определение потенциала снижения потребляемой мощности в результате уравновешивания установок скважинных штанговых насосов

Были проведены расчеты потенциала снижения потребляемой мощности в результате выполнения мероприятий по уравновешиванию установок СШН.

Для этого определяется активная энергия за период качания установки СШН:

$$W = \int_0^T p dt,$$

где p – мгновенное значение активной мощности, Вт; T – период качания установки СШН, с.

Затем находится эффективное значение активной мощности за период качания:

$$P_{ef} = \frac{W}{T} = \frac{\int_0^T p dt}{T}.$$

Далее при помощи зависимости, приведенной на рис. 4, определяется перерасход мощности Δ при данном значении коэффициента неуравновешенности k .

Находится эффективное значение активной мощности, которое будет потребляться электроприводом установки СШН после уравновешивания:

$$P'_{ef} = \frac{P_{ef} \cdot 100 \%}{100 + \Delta},$$

где P'_{ef} – эффективное значение активной мощности после уравновешивания, Вт; Δ – перерасход мощности из-за недостаточной балансировки установки, %.

Результаты расчетов потенциала снижения потребляемой мощности в результате уравновешивания установок СШН приведены в табл. 2.

Как видно из табл. 2, если произвести балансировку проанализированных скважин, то потребляемая их электроприводами мощность снизится на 5...20 %.

Таким образом, балансировка установок СШН способна существенно снизить потребление электроэнергии скважинных насосных установок при сохранении объемов добычи на прежнем уровне.

Таблица 2. Результаты расчетов потенциала снижения потребляемой мощности в результате уравновешивания установок скважинных штанговых насосов

Table 2. Results of calculating the potential for reducing power consumption as a result of the sucker rod pump units balancing

| Номер скважины Number of well | P_{ef} , кВт/ kW | Коэффициент неуравновешенности k Imbalance coefficient k | P'_{ef} , кВт/ kW | Снижение потребляемой мощности, % Reduced power consumption, % |
|----------------------------------|-----------------------|---|------------------------|---|
| 1 | 5,54 | 0,065 | 5,29 | 4,76 |
| 2 | 7,27 | -0,12 | 5,59 | 23,08 |
| 3 | 6,01 | -0,06 | 5,78 | 3,85 |
| 4 | 6,81 | -0,085 | 5,77 | 15,25 |
| 5 | 2,93 | 0,14 | 2,55 | 13,04 |
| 6 | 9,62 | 0,05 | 9,62 | 0,00 |
| 7 | 8,92 | 0,085 | 8,11 | 9,09 |
| 8 | 7,62 | -0,075 | 6,87 | 9,91 |
| 9 | 6,41 | -0,11 | 5,05 | 21,26 |
| 10 | 18,44 | -0,06 | 17,74 | 3,85 |

Выводы

На основании проведенного исследования могут быть сделаны следующие выводы:

1. Ваттметрирование является эффективным методом контроля состояния наземного оборудования и степени сбалансированности установок скважинных штанговых насосов.
2. Сбалансированность, или уравновешенность, установок скважинных штанговых насосов может оцениваться по значениям тока, активной мощности, потребляемой за полупериоды электроэнергии, либо по скорости или времени движения точки подвеса штанг.
3. Анализ ваттметрограмм скважин действующего фонда месторождений Западной Сибири показал, что только 2 % установок скважинных штанговых насосов могут считаться сбалансированными (имеющими коэффициент неуравновешенности от минус 0,05 до +0,05). При этом 35 % скважинных насосных установок имеют коэффициент неуравновешенности менее минус 0,5 или более +0,5.
4. Недостаточная сбалансированность установок скважинных штанговых насосов вызывает перерасход электроэнергии и приводит к работе электродвигателя в недогруженном режиме с низкими значениями коэффициента мощности и коэффициента полезного действия.
5. Если произвести балансировку установок скважинных штанговых насосов всех рассмотренных скважин, то потребление ими электроэнергии снизится на 5...20 %. Это позволяет считать балансировку установок скважинных штанговых насосов одним из наиболее эффективных энергосберегающих мероприятий для нефтедобывающих предприятий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ефремов В.В., Маркман Г.З. «Энергосбережение» и «энергоэффективность»: уточнение понятий, система сбалансированных показателей энергоэффективности // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2007. – Т. 311. – № 4. – С. 146–148.
2. Energy efficiency in the industrial sector in the EU, Slovenia, and Spain / J. Malinauskaitė, H. Jouhara, B. Egilegor, F. Al-Mansour, L. Ahmad, M. Pusnik // *Energy*. – 2020. – V. 208. – 118398 p.
3. Nyangarika A.M., Tang B. Influence oil price towards economic indicators in Russia // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2018. – V. 192. – № 1. – 012066 p.
4. Ardito L., Petruzzelli A.M., Ghisetti C. The impact of public research on the technological development of industry in the green energy field // *Technological Forecasting and Social Change*. – 2019. – V. 144. – P. 25–35.
5. Букреев В.Г., Сипайлова Н.Ю., Сипайлов В.А. Стратегия управления электротехническим комплексом механизированной добычи нефти на основе экономического критерия // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2017. – Т. 328. – № 3. – С. 75–84.
6. Зюзев А.М., Бубнов М.В. Диагностика уравновешенности штанговой глубинной насосной установки по ваттметрограмме // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330. – № 4. – С. 178–187.
7. Khakimyanov M.I. et al. Monitoring of sucker-rod pump units as a result of the analysis wattmeter cards // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2017. – V. 803. – № 1. – 012066 p.
8. Zyuzev A.M., Bubnov M.V. Model for sucker-rod pumping unit operating modes analysis based on SimMechanics library // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2018. – V. 944. – № 1. – 012130 p.
9. Method of efficient control of the sucker-rod pump electric drive / A.N. Ladygin, D.D. Bogachenko, V.V. Kholin, N.A. Ladygin // 27th International Workshop on Electric Drives: MPEI Department of Electric Drives 90th Anniversary (IWED). – Moscow, 2020. – P. 1–4.
10. A method for diagnosing formation fluid leakage during the operation of sucker rod pumps and a device for its implementation / R.A. Heydar, A.R. Sharif, H.V. Mamed, G.Z. Gazanfar // *American Journal of Energy Engineering*. – 2020. – V. 8. – № 4. – P. 40–44.
11. Гизатуллин Ф.А., Хакимьянов М.И. Анализ режимов работы электроприводов штанговых скважинных насосных установок // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2017. – Т. 13. – № 1. – С. 11–18.
12. Computational fluid dynamics model to improve sucker rod pump operating mode / S.V. Jalikop, B. Scheichl, S.J. Eder, S. Hönig // *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. – Denver, 2020. – P. 1–14.
13. Выбор критерия уравновешенности штанговых скважинных насосных установок / Г.И. Бикбулатова, Г.И. Болтнева, А.С. Галеев, Р.Н. Сулейманов, С.Л. Сабанов // *Газовая промышленность*. – 2019. – № 11 (792). – С. 124–128.
14. Zyuzev A.M., Bubnov M.V. SRPU balance monitoring by wattmeter card // 17th International Ural Conference on AC Electric Drives (ACED). – Ekaterinburg, 2018. – P. 1–5.
15. Миловзоров Г.В., Ширококов П.Э., Хакимьянов М.И. Технологические процессы исследования штанговых глубинных насосов на основе динамометрирования и ваттметрирования // Информационные технологии в науке, промышленности и образовании. – Ижевск: Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова, 2017. – С. 160–165.
16. Zheng B., Gao X., Pan R. Sucker rod pump working state diagnosis using motor data and hidden conditional random fields // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. – 2019. – V. 67. – № 9. – P. 7919–7928.
17. Хакимьянов М.И. Повышение эффективности эксплуатации электроприводов нефтедобывающих штанговых глубинных насосов // *Электрооборудование: эксплуатация и ремонт*. – 2018. – № 1–2. – С. 82–89.
18. Solodkiy E.M., Kazantsev V.P., Dadenkov D.A. Improving the energy efficiency of the sucker-rod pump via its optimal counterbalancing // 2019 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). – Sochi, 2019. – P. 1–5.
19. Zhang R. et al. A real-time diagnosis method of reservoir-wellbore-surface conditions in sucker-rod pump wells based on multidata combination analysis // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2021. – V. 198. – 108254 p.
20. Садов В.Б. Определение дефектов оборудования нефтяной скважины по динамограмме // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника*. – 2013. – Т. 13. – № 1. – С. 61–71.
21. Интеллектуализированная станция управления станком-качалкой / Г.А. Гулуев, А.Г. Рзаев, Я.Г. Алиев, М.Г. Ризванов, И.Р. Саттаров // *Мехатроника, автоматизация, управление*. – 2011. – № 8. – С. 17–21.
22. Контроль технического состояния ШСНУ в процессе периодической эксплуатации / А.С. Галеев, Р.И. Арсланов, П.П. Ермилов, И.А. Кузьмин // *Сетевое издание «Нефтегазовое дело»*. – 2012. – № 1. – С. 24–29.
23. Modular structure of the intelligent oil production equipment control station / С. Tagirova, A. Gladkih, D. Bakiev, A. Vulfin // 2nd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA). – Lipetsk, 2020. – P. 539–544.
24. A working condition diagnosis model of sucker rod pumping wells based on deep learning / X. Wang, Y. He, F. Li, Z. Wang, X. Dou, H. Xu, L. Fu // *SPE Production & Operations*. – 2021. – V. 36. – № 02. – P. 317–326.
25. Исаченко И.Н., Гольдштейн Е.И., Налимов Г.П. Методы контроля сбалансированности станка-качалки на основе измерения электрических параметров // *Нефтяное хозяйство*. – 2002. – № 1. – С. 60–61.
26. Деев В.Г., Смородов Е.А., Исмаков Р.А. Методы экспресс-оценки качества фонда нефтедобывающих скважин // *Известия высших учебных заведений. Нефть и газ*. – 2001. – № 1. – С. 40–45.
27. Байков И.Р., Смородов Е.Л., Соловьев В.Я. Динамические нагрузки в штангах глубинных насосов и их влияние на безопасность эксплуатации // *Известия высших учебных заведений. Нефть и газ*. – 2003. – № 1. – С. 41–45.
28. A real-time diagnosis method of reservoir-wellbore-surface conditions in sucker-rod pump wells based on multidata combination analysis / R. Zhang, Y. Yin, L. Xiao, D. Chen // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2021. – V. 198. – 108254 p.

Поступила 16.06.2021 г.

Информация об авторах

Яшин А.Н., ассистент кафедры электротехники и электрооборудования предприятий Уфимского государственного нефтяного технического университета.

Хакимьянов М.И., доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой электротехники и электрооборудования предприятий Уфимского государственного нефтяного технического университета.

UDC 622.276.53

BALANCE OF SUCKER ROD PUMP UNITS BASED ON ANALYSIS OF WATTMETROGRAMS

Anton N. Yashin¹,
yashin.anton.2012@mail.ru

Marat I. Khakimyanov¹,
hakimyanovmi@gmail.com

¹ Ufa State Petroleum Technological University,
1, Kosmonavtov street, Ufa, 450064, Russia.

The relevance. A significant part of the oil production wells in our country is operated by sucker rod pumping units. Low-speed asynchronous electric motors with increased starting torque are used as drives for sucker rod pumping units. Electric motors of such units operate in underloaded modes with cyclically varying load. Such modes negatively affect both the operation of the electric motors themselves and the electrical network. The energy characteristics of the motors, such as efficiency and power factor, are impaired. The balancing of the sucker rod pump units by adjusting the counterweight weights allows the load to be made more uniform, improving the drive modes and reducing power consumption. However, it is rather difficult to assess the balance of operating units, since wells are usually not equipped with sensors for measuring wattmeter cards and assessing balance. In the fields, balancing is often carried out using conventional multimeters with current clamps. Therefore, it is important to assess the balance of the wells of the operating stock and the resulting excessive consumption of electricity.

The main aim of the research is to explore the downhole pumping systems existing fund in terms of balance; determine what part of the fund of downhole pumping units is balanced, what unbalance coefficient other wells have; evaluate the influence of the balance of sucker rod pump units on electricity consumption; draw conclusions about the excessive consumption of electricity as a result of insufficient balance.

Objects: oil producing wells, borehole sucker rod pumping units, asynchronous electric drives.

Methods: statistical analysis of wattmeter cards; mathematical methods for analyzing wattmeter cards with determining the average value of power consumption, the coefficient of imbalance, and the potential for energy saving.

Results. It was found that only 2 % of borehole pumping units can be considered balanced. At the same time, 35 % of borehole pumping units have an unbalance coefficient worse than 0,5. The negative effect of insufficient balancing of sucker rod pumps on power consumption is shown. As a result of rebalancing, the energy consumption of borehole pump drives can be reduced by more than 2 times while maintaining production volumes.

Key words:

Oil production well, sucker rod pump unit, asynchronous electric drive, wattmeter card, balancing, energy consumption.

REFERENCES

- Efremov V.V., Markman G.Z. «Energy saving» and «Energy efficiency»: clarification of concepts, system of balanced energy efficiency indicators. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2007, vol. 311, no. 4, pp. 146–148. In Rus.
- Malinauskaite J., Jouhara H., Egilegor B., Al-Mansour F., Ahmad L., Pusnik M. Energy efficiency in the industrial sector in the EU, Slovenia, and Spain. *Energy*, 2020, vol. 208, 118398 p.
- Nyngarika A.M., Tang B. Influence oil price towards economic indicators in Russia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2018, vol. 192, no. 1, 012066 p.
- Ardito L., Petruzzelli A.M., Ghisetti C. The impact of public research on the technological development of industry in the green energy field. *Technological Forecasting and Social Change*, 2019, vol. 144, pp. 25–35.
- Bukreev V.G., Sipaylova N.Yu., Sipaylov V.A. Management strategy of the electrotechnical complex of mechanized oil production based on the economic criterion. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 3, pp. 75–84. In Rus.
- Zyuzev A.M., Bubnov M.V. Diagnostics of the balance of the rod deep pumping unit according to the wattmetrogram. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 4, pp. 178–187. In Rus.
- Khakimyanov M.I. Monitoring of sucker-rod pump units as a result of the analysis wattmeter cards. *Journal of Physics: Conference Series*, 2017, vol. 803, no. 1, 012066 p.
- Zyuzev A.M., Bubnov M.V. Model for sucker-rod pumping unit operating modes analysis based on SimMechanics library. *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, vol. 944, no. 1, 012130 p.
- Ladygin A.N., Bogachenko D.D., Kholin V.V., Ladygin N.A. Method of efficient control of the sucker-rod pump electric drive. *27th International Workshop on Electric Drives: MPEI Department of Electric Drives 90th Anniversary (IWED)*. Moscow, 2020. pp. 1–4.
- Heydar R.A., Sharif A.R., Mamed H.V., Gazanfar G.Z. A method for diagnosing formation fluid leakage during the operation of sucker rod pumps and a device for its implementation. *American Journal of Energy Engineering*, 2020, vol. 8, no. 4, pp. 40–44.
- Gizatullin F.A., Khakimyanov M.I. Analysis of operating modes of electric drives of rod borehole pumping units. *Electrotechnical and information complexes and systems*, 2017, vol. 13, no. 1, pp. 11–18. In Rus.
- Jalikip S.V., Scheichl B., Eder S.J., Höning S. Computational fluid dynamics model to improve sucker rod pump operating mode. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, Society of Petroleum Engineers, Denver, 2020. pp. 1–14.
- Bikbulatova G.I., Boltneva G.I., Galeev A.S., Suleymanov R.N., Sabanov S.L. Selection of the balance criterion for rod borehole pumping units. *Gas industry*, 2019, no. 11 (792), pp. 124–128. In Rus.
- Zyuzev A.M., Bubnov M.V. SRPU balance monitoring by wattmeter card. *2018 17th International Ural Conference on AC Electric Drives (ACED)*. Ekaterinburg, 2018. pp. 1–5.
- Milovzorov G.V., Shirobokov P.E., Khakimyanov M.I. Tekhnologicheskie protsessy issledovaniya shtangovykh glubinykh nasosov na osnove dinamometrirovaniya i vattmetrirovaniya [Technological processes of research of rod depth pumps based on dynamometry and wattmetry]. *Informatsionnye tekhnologii v nauke, promyshlennosti i obrazovanii* [Information Technologies in Science, Industry and Education]. Izhevsk, Kalashnikov Izhevsk State Technical University Publ., 2017. pp. 160–165.
- Zheng B., Gao X., Pan R. Sucker rod pump working state diagnosis using motor data and hidden conditional random fields. *IEEE*

- Transactions on Industrial Electronics*, 2019, vol. 67, no. 9, pp. 7919–7928.
17. Khakimyanov M.I. Improving the efficiency of operation of electric drives of oil-producing rod depth pumps. *Electrical equipment: operation and repair*, 2018, no. 1–2, pp. 82–89. In Rus.
 18. Solodkiy E.M., Kazantsev V.P., Dadenkov D.A. Improving the energy efficiency of the sucker-rod pump via its optimal counterbalancing. *2019 International Russian Automation Conference (RusAutoCon)*. Sochi, 2019. pp. 1–5.
 19. Zhang R. A real-time diagnosis method of reservoir-wellbore-surface conditions in sucker-rod pump wells based on multidata combination analysis. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2021, vol. 198, 108254 p.
 20. Sadov V.B. Determination of defects in oil well equipment by dynamogram. *Bulletin of the South Ural State University. Series: Computer technologies, control, radio electronics*, 2013, vol. 13, no. 1, pp. 61–71. In Rus.
 21. Gulyaev G.A., Rzaev A.G., Aliev Ya.G., Rizvanov M.G., Satarov Yu.R. Intellectualized control station of the rocking machine. *Mechatronics, automation, control*, 2011, no. 8, pp. 17–21. In Rus.
 22. Galeev A.S., Arslanov R.I., Ermilov P.P., Kuzmin I.A. Control of the technical condition of the SHSNU in the process of periodic operation. *Online publication «Oil and Gas business»*, 2012, no. 1, pp. 24–29. In Rus.
 23. Tagirova C., Gladkih A., Bakiev D., Vulfin A. Modular Structure of the Intelligent Oil Production Equipment Control Station. *2nd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA)*. Lipetsk, 2020. pp. 539–544.
 24. Wang X., He Y., Li F., Wang Z., Dou X., Xu H., Fu L. A working condition diagnosis model of sucker rod pumping wells based on deep learning. *SPE Production & Operations*, 2021, vol. 36, no. 02, pp. 317–326.
 25. Isachenko I.N., Goldstein E.I., Nalimov G.P. Methods for controlling the balance of the rocking machine on the basis of measuring electrical parameters. *Oil industry*, 2002, no. 1. pp. 60–61. In Rus.
 26. Deev V.G., Smorodov E.A., Ismakov R.A.. Methods of express assessment of the quality of the fund of oil-producing wells. *News of higher educational institutions. Oil and gas*, 2001, no. 1, pp. 40–45. In Rus.
 27. Baykov I.R., Smorodov E.L., Solovyov V.Ya.. Dynamic loads in the rods of deep pumps and their impact on the safety of operation. *News of higher educational institutions. Oil and gas*, 2003, no. 1, pp. 41–45. In Rus.
 28. Zhang R., Yin Y., Xiao L., Chen D. A real-time diagnosis method of reservoir-wellbore-surface conditions in sucker-rod pump wells based on multidata combination analysis. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2021, vol. 198, 108254 p.

Received: 16 June 2021.

Information about the authors

Anton N. Yashin, assistant, Ufa State Petroleum Technological University.

Marat I. Khakimyanov, Dr. Sc., professor, Ufa State Petroleum Technological University.

УДК 661.832.321

ДЕГРАДАЦИЯ ФЕРРОЦИАНИДА КАЛИЯ, ИСПОЛЬЗУЕМОГО В КАЧЕСТВЕ АНТИСЛЕЖИВАТЕЛЯ

Пойлов Владимир Зотович¹,
vladimirpoilov@mail.ru

Кузьминых Константин Геннадьевич¹,
kgkuz@mail.ru

Титков Станислав Николаевич²,
Stanislav.Titkov@uralkali.com

Алиферова Светлана Николаевна³,
Svetlana.Aliferova@uralkali.com

¹ Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Россия, 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29.

² АО «ВНИИ Галургии»,
Россия, 190103, г. Санкт-Петербург, ул. 10-я Красноармейская, 22, литера А.

³ ПАО «Уралкалий»,
Россия, 618426, Россия, г. Березники, ул. Пятилетки, 63.

Актуальность. Повышение качества поставляемых за рубеж калийных удобрений, в показатели которых входит величина слеживаемости, представляет собой актуальную проблему. В качестве антислеживателя для хлорида калия может быть использован ферроцианид калия, который имеет существенный недостаток, заключающийся в том, что в процессе хранения продукта КСl на складе в течение суток наблюдается дегградация и снижение содержания ферроцианида калия на 20 %, что впоследствии при транспортировке морским или железнодорожным транспортом приводит к слеживаемости продукта и рекламациям потребителей. Анализ причин дегградации показал, что в водных растворах может происходить гидролиз ферроцианидов.

Цель: установление причин дегградации и снижения содержания ферроцианида калия на поверхности кристаллов продукта хлорида калия.

Методы. Для установления процесса дегградации водного раствора ферроцианида калия использовали теоретический анализ литературных данных по механизму разложения ферроцианида калия, методы термодинамического, синхронного термического, химического анализа и электронной микроскопии.

Результаты. Теоретическим анализом и экспериментальным путем установлено, что химическая дегградация ферроцианида калия протекает в основном при термической обработке водного раствора антислеживателя с образованием осадка гидроксида железа и синильной кислоты. Поскольку в промышленных условиях раствор антислеживателя распрыскивают на горячий продукт КСl, проведены эксперименты, в которых растворы ферроцианида калия с различной концентрацией наносили на хлорид калия и подвергали термической обработке. Установлено, что с увеличением температуры обработки продукта КСl с 60 до 120 °С процесс дегградации антислеживателя усиливается, а остаточное содержание ферроцианида калия в продукте снижается. С повышением температуры термообработки и концентрации ферроцианида калия в растворе антислеживателя его потери на хлориде калия возрастают. При этом повышенная температура поступающего из сушильного аппарата горячего продукта хлорида калия способствует ускорению высыхания раствора антислеживателя, что ухудшает его распределение на поверхности кристаллов продукта КСl.

Ключевые слова:

Хлорид калия, антислеживатель, ферроцианид калия, водный раствор, дегградация.

Введение

Крупнотоннажный продукт – галургический хлорид калия, получаемый из сильвинитовых руд методом растворения – кристаллизации, при хранении и транспортировке слеживается, становится более гигроскопичным и теряет сыпучесть. На слеживаемость хлорида калия оказывают влияние размеры и форма получаемых кристаллов, которые формируются в процессе кристаллизации [1–3]. В промышленных условиях массовой кристаллизации сложно обеспечивать получение крупных, однородных по форме и размерам кристаллов. Достаточно эффективным и распространенным способом устранения слеживаемости хлорида калия является нанесение на поверх-

ность кристаллов антислеживателей, в качестве которых могут использоваться различные вещества [4–10], в том числе ферроцианид калия [11, 12].

При обработке галургического хлористого калия на ПАО «Уралкалий» раствором антислеживателя, содержащего ферроцианид калия, наблюдается снижение содержания данного вещества на поверхности хлористого калия. Так, по данным лаборатории ПАО «Уралкалий», после обработки галургического хлорида калия антислеживателем, в процессе хранения продукта на складе за небольшой период времени (менее суток) происходит снижение его содержания на 20 % отн., что приводит к слеживаемости продукта и ухудшает его товарные качества.

Цель исследования: установление причин деградации антислеживателя и снижения содержания ферроцианида калия на поверхности продукта хлорида калия.

Для достижения указанной цели проведены исследования, направленные на выявление причин деградации и изучение влияния температуры в процессе нанесения ферроцианида калия на галургический хлорид калия.

Объект исследования

Ферроцианид калия выпускается в виде трехводного кристаллогидрата [13]. С целью выявления термического поведения ферроцианида калия был проведен синхронный термический анализ на приборе фирмы «Netch» (Германия), включающий дифференциально-термический и термогравиметрический методы анализа со скоростью нагрева образца

5 град/мин в среде воздуха в интервале температур 40–200 °С. Термограмма ферроцианида калия приведена на рис. 1. Зеленая кривая относится к изменению веса образца, синяя кривая отражает эндотермический эффект отщепления кристаллогидратной воды, пунктирная кривая показывает скорость изменения веса образца.

Из анализа термограммы следует, что при нагревании ферроцианида калия с 40 до 68,6 °С происходит удаление физической влаги (0,73 %), а в области температур 69–113,4 °С происходит процесс дегидратации с удалением 9,75 % кристаллогидратной воды. Теоретическое содержание кристаллогидратной воды в трехводном ферроцианиде калия соответствует 12,78 %. Отсюда следует, что при нагревании твердого трехводного ферроцианида калия до 113,4 °С произошла дегидратация 76,29 % кристаллогидратной воды.

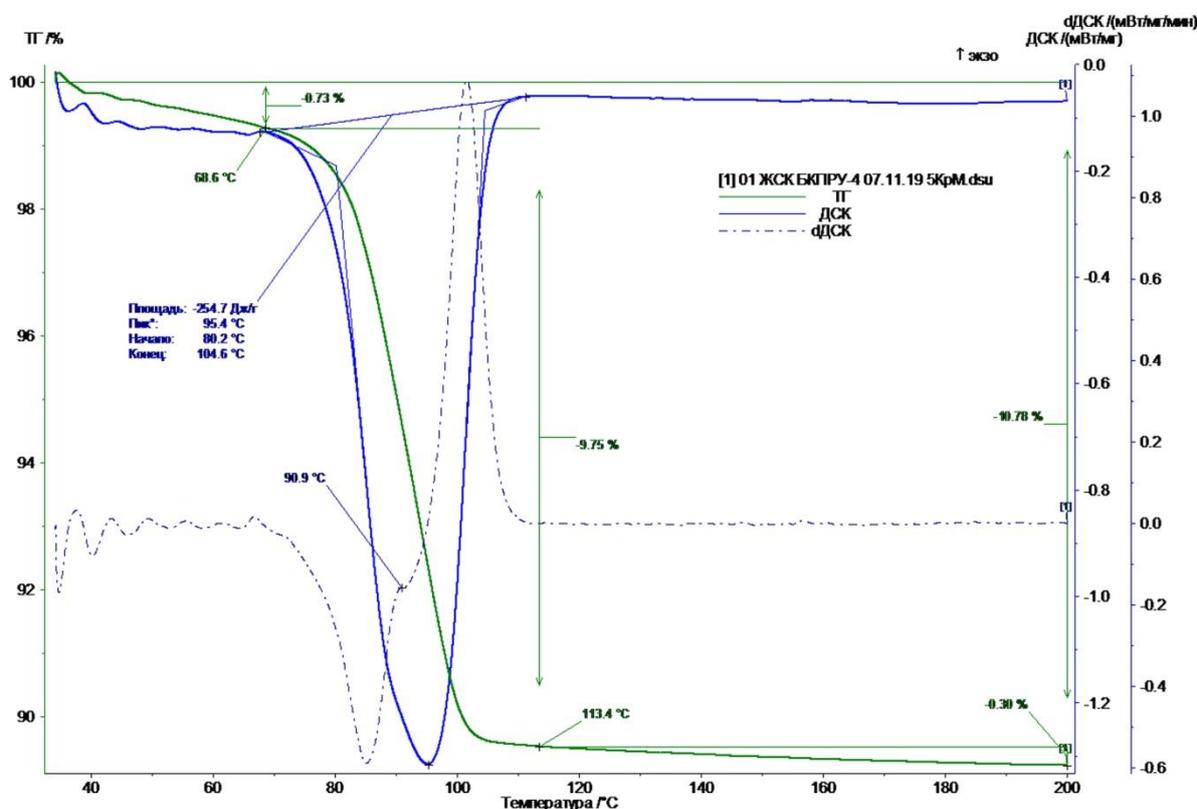


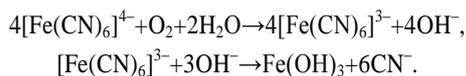
Рис. 1. Термограмма твердого трехводного ферроцианида калия

Fig. 1. Thermogram of solid three-water potassium ferrocyanide

Процесс дегидратации сопровождается эндотермическим эффектом, причем отщепление молекул воды происходит ступенчато. Первая порция воды (4,9 %) отщепляется в области температур 69–90,9 °С, а вторая – в области температур 91–110 °С (с максимальной скоростью отщепления). Общая потеря массы в указанном температурном интервале составляет 10,78 %. Таким образом, проведенный термический анализ показал, что в диапазоне температур 40–200 °С удаляется физическая и кристаллогидратная вода, а процессы пиролиза или термогидролиза ферроцианида калия не происходят.

Теоретический анализ

По данным литературных источников [14–20], в водных растворах происходит разложение ферроцианидов с образованием иона $CN^{\cdot-}$. На процесс разложения ферроцианидов оказывают влияние концентрация, рН среды, температура, наличие кислорода, воздействие ультрафиолетового излучения и другие. В присутствии кислорода распад водных растворов $[Fe(CN)_6]^{4-}$ в нейтральных и щелочных средах сопровождается осаждением гидроксида железа (III). При разложении возможно протекание следующих химических реакций:



Для представленных химических реакций был проведен термодинамический анализ, который показал, что в температурном диапазоне от 25 до 100 °С в нейтральных и щелочных растворах в присутствии кислорода воздуха (растворенного и соприкасающегося с поверхностью раствора) происходит разложение иона $[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{4-}$ до $\text{Fe}(\text{OH})_3$, результаты которого представлены на рис. 2.

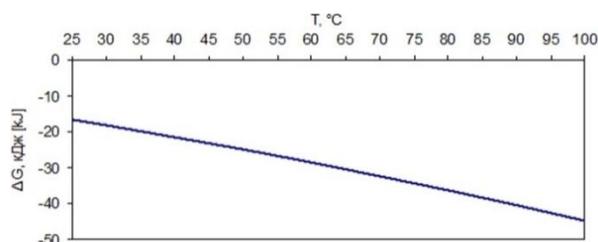
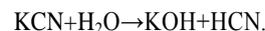


Рис. 2. Изменение энергии Гиббса в диапазоне температур от 25 до 100 °С для реакции $4[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{4-} + \text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 4[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{3-} + 4\text{OH}^-$

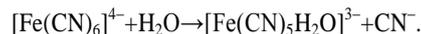
Fig. 2. Change in Gibbs energy in the temperature range from 25 to 100 °С for the reaction $4[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{4-} + \text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 4[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{3-} + 4\text{OH}^-$

График изменения энергии Гиббса свидетельствует о том, что при увеличении температуры термодинамическая вероятность протекания данной реакции возрастает, что приводит к увеличению выхода гид-

роксида железа (III). Ион CN^- связывается с ионом K^+ с образованием растворенного KCN. В свою очередь KCN в водном растворе подвергается гидролизу с получением HCN:



Образующаяся в результате гидролиза HCN является легколетучей. Вследствие удаления (испарения) HCN равновесие реакции гидролиза смещается в сторону продуктов реакции, что ведет к потерям ферроцианида калия. Также авторы [14] отмечают, что ион Fe^{3+} способен образовывать комплексные соединения, лигандами в которых выступает вода. При этом реакция гидролиза может быть представлена в виде реакции:



Замещение ионов CN^- в комплексном соединении может происходить до полного их замещения с образованием $\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_6^{2+}$.

Результаты и их анализ

Для качественной оценки процесса деградации раствора ферроцианида калия был проведен эксперимент, в котором приготовлен водный раствор с концентрацией 10 %, который в дальнейшем был подвергнут нагреванию до температуры 99 °С с выдержкой в течение 30 минут. После этого раствор подвергли охлаждению до комнатной температуры и выдерживали в течение 3 суток. На рис. 3 представлен внешний вид водного раствора ферроцианида калия до и после температурной обработки.

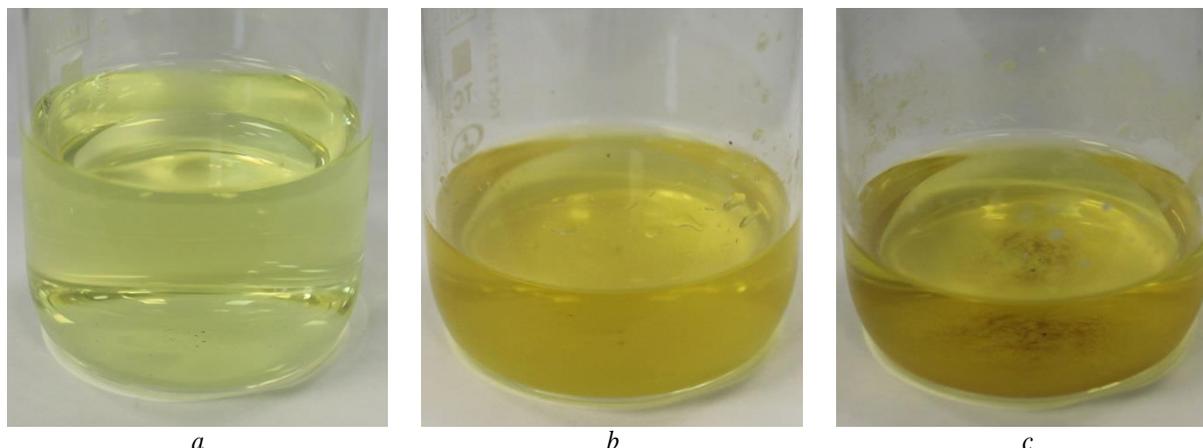


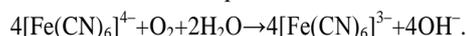
Рис. 3. Фотографии водного раствора ферроцианида калия до и после температурной обработки: а) свежеприготовленный раствор; б) после температурной обработки при $T=99$ °С; в) после температурной обработки при $T=99$ °С и хранения при комнатной температуре в течение трех суток

Fig. 3. Photos of potassium ferrocyanide aqueous solution before and after heat treatment: а) freshly prepared solution; б) after heat treatment at $T=99$ °С and cooling to room temperature; в) after heat treatment at $T=99$ °С and storage at room temperature for three days

После хранения раствора ферроцианида калия, подвергнутого термической обработке, в течение трех суток при комнатной температуре в нем наблюдается появление осадка (рис. 2), рН раствора при этом составляет 9,75. Величина рН свежеприготовленного раствора составила 8,88. Уменьшение величины рН раствора в результате хранения можно объяснить образованием гидроксида железа (III) [14], который представляет со-

бой твердый осадок красно-коричневого цвета с произведением растворимости $\text{PP} \approx 10^{-37}$ [21].

Изменение окраски и рН раствора свидетельствует о том, что в результате температурной обработки происходит гидролиз раствора ферроцианида калия. Увеличение величины рН раствора можно объяснить протеканием химической реакции:



Поскольку в промышленных условиях раствор антислеживателя распыляют на горячий продукт KCl, были проведены эксперименты, в которых растворы ферроцианида калия с различной концентрацией были нанесены на хлорид калия и подвергнуты термической обработке при различных температурах. Методика эксперимента состояла в следующем. На аналитических весах были взяты две навески хлорида калия (отобранного после сушки, без обработки антислеживателем) в количестве 66,67 г с точностью до 0,01 г. В одну навеску с использованием пипетки внесли 0,2 мл раствора антислеживателя; во вторую – 0,4 мл раствора антислеживателя. Каждую из смесей после нанесения раствора антислеживателя перемешивали в течение 15 минут для равномерного распределения антислеживателя на поверхности кристаллов хлорида калия. Каждая из партий была разделена на пять частей и помещена в чашки Петри. Одну из проб хлорида калия с различным содержанием раствора антислеживателя оставляли на воздухе при комнатной температуре, остальные подвергали термической обработке при 60; 80; 120; 130 °С в течение 1 часа в сушильном шкафу, предварительно разогретом до необходимой температуры. Пробы галургического хлорида калия анализировали на содержание ферроцианида калия фотоколориметрическим методом.

Результаты измерения количественного содержания ферроцианида калия в хлориде калия после термической обработки представлены в табл. 1.

Таблица 1. Содержание ферроцианида калия в хлориде калия после термической обработки при различных температурах с различным количеством внесенного раствора антислеживателя (содержание в растворе 2 %)

Table 1. Content of potassium ferrocyanide in potassium chloride after heat treatment at various temperatures with a different amount of anti-caking agent solution introduced (the content in the solution is 2 %)

| № | Количество нанесенного на KCl антислеживателя, мл Amount of anti-caking agent on KCl, ml | Температура обработки, °С Processing temperature, °C | Остаточное содержание ферроцианида калия в KCl, г/т Residual content of potassium ferrocyanide in KCl, gram/ton | Потери ферроцианида калия (по сравнению с T=25 °С), мас. % Loss of potassium ferrocyanide (compared with T=25 °C), wt. % |
|---|---|---|--|---|
| 1 | 0,2 | 25 | 74 | – |
| 2 | 0,2 | 60 | 57 | 22,97 |
| 3 | 0,2 | 80 | 59 | 20,27 |
| 4 | 0,2 | 120 | 54 | 27,02 |
| 5 | 0,4 | 25 | 122 | – |
| 6 | 0,4 | 60 | 110 | 9,84 |
| 7 | 0,4 | 80 | 109 | 10,65 |
| 8 | 0,4 | 120 | 105 | 13,93 |

При внесении раствора антислеживателя в 2 раза большем количестве (0,4 мл по сравнению с 0,2 мл, опыты 5–8) в результате термической обработки с повышением температуры также наблюдается снижение остаточного содержания ферроцианида калия.

С целью оценки влияния концентрации ферроцианида калия в растворе антислеживателя проведены эксперименты с обработкой хлорида калия антислеживателем с концентрацией 5 и 10 %. Результаты экспериментов представлены в табл. 2.

Таблица 2. Содержание ферроцианида калия в хлориде калия после термической обработки при различных температурах (содержание в растворе 5 и 10 %)

Table 2. Content of potassium ferrocyanide in potassium chloride after heat treatment at various temperatures (the content in the solution is 5 and 10 %)

| № | Содержание ферроцианида калия в растворе антислеживателя, мас. % Content of potassium ferrocyanide in a solution of anti-caking agent, wt. % | Температура обработки, °С Processing temperature, °C | Остаточное содержание ферроцианида калия в KCl, г/т Residual content of potassium ferrocyanide in KCl, gram/ton | Потери ферроцианида калия (по сравнению с T=25 °С), мас. % Loss of potassium ferrocyanide (compared with T=25 °C), wt. % |
|---|---|---|--|---|
| 1 | 5 | 25 | 162 | – |
| 2 | 5 | 60 | 100 | 38,27 |
| 3 | 5 | 80 | 98 | 39,50 |
| 4 | 5 | 120 | 110 | 32,10 |
| 5 | 10 | 25 | 306 | – |
| 6 | 10 | 60 | 171 | 44,12 |
| 7 | 10 | 80 | 163 | 46,73 |
| 8 | 10 | 120 | 171 | 44,12 |

Из анализа данных табл. 1, 2 следует, что с увеличением температуры обработки продукта KCl с 60 до 120 °С остаточное содержание ферроцианида калия в галургическом продукте существенно снижается. С повышением температуры термообработки и концентрации ферроцианида калия в растворе антислеживателя его потери возрастают и составляют:

- до 27 % при использовании раствора с концентрацией 2 %;
- до 39,5 % при использовании раствора с концентрацией 5 %;
- до 46,7 % при использовании раствора с концентрацией 10 %.

Исходя из проведенного теоретического анализа и полученных экспериментальных данных можно заключить, что деградация и потери ферроцианида калия при хранении на складе продукта KCl происходят за счет термогидролиза раствора ферроцианида калия после нанесения антислеживателя на горячий продукт KCl, поступающий на склад после аппаратов сушки с высокой температурой.

Следует отметить, что повышенная температура продукта KCl влияет не только на деградацию, но и на равномерность распределения антислеживателя на кристаллах продукта. На рис. 4 представлена микрофотография поверхности кристалла галургического хлорида калия после нанесения раствора антислеживателя на горячий продукт. Фотографии сделаны с использованием сканирующего электронного микроскопа «S-3400N» японской фирмы «НИТАСИ» «Центра наукоёмких химических технологий и физико-химических исследований» ПНИПУ.

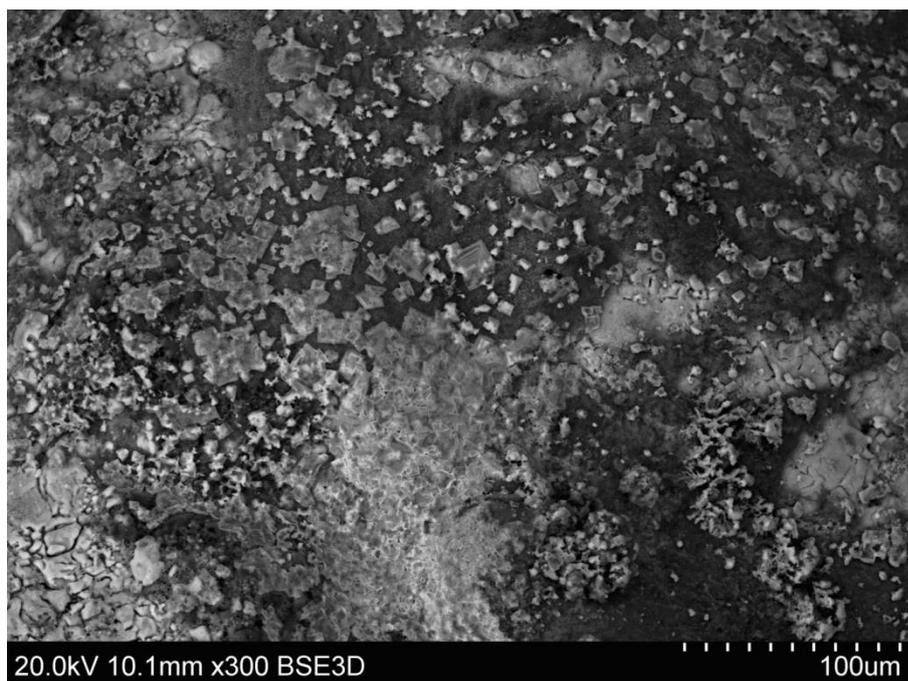


Рис. 4. Микрофотография поверхности галургического хлорида калия после нанесения раствора антислеживателя, содержащего ферроцианид калия, на горячий продукт, увеличение 300X

Fig. 4. Micrograph of galurgic potassium chloride surface after applying an anti-caking agent solution containing potassium ferrocyanide to a hot product, magnification 300X

Из анализа микрофотографии образца галургического хлорида калия следует, что частицы ферроцианида калия покрывают кристаллы KCl неравномерно и не сплошным слоем, а в виде островков. При этом микрокристаллы антислеживателя имеют размеры менее 5 мкм. Неравномерное распределение ферроцианида калия по поверхности хлорида калия можно объяснить тем, что при повышенных температурах продукта KCl происходит быстрое испарение воды из пленки раствора антислеживателя, нанесенного на KCl.

Выводы

По данным термодинамического анализа и проведенных экспериментов выявлено, что при нанесении раствора антислеживателя (содержащего в своем составе ферроцианид калия) на горячий галургический хлорид калия, поступающий на склад после аппаратов сушки, протекает термогидролиз ферроцианида

калия, сопровождаемый образованием осадка гидроксида железа (III). Оба этих процесса снижают эффективность использования ферроцианида калия в качестве антислеживателя.

Установлено, что с увеличением температуры продукта KCl с 60 до 120 °С деградация ферроцианида калия усиливается и его остаточное содержание в продукте снижается. Повышенная температура горячего хлорида калия способствует также ускорению высыхания пленки раствора антислеживателя, что ведет к неравномерному распределению на поверхности кристаллов продукта хлорида калия.

Исследования проведены по проекту Министерства науки и образования РФ RFMEFI62120X0038 от «27» апреля 2020 г. № 075-15-2020-532 с использованием научного оборудования «Центра наукоёмких химических технологий и физико-химических исследований» Пермского национального исследовательского политехнического университета.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Design and mechanism of the formation of spherical KCl particles using cooling crystallization without additives / Shasha Jin, Mingyang Chen, Zhenfang Li, Songgu Wu, Shichao Du, Shijie Xu, Sohrab Rohani, Junbo Gong // Powder Technology. – 2018. – V. 329. – P. 455–462.
2. The time and location dependent prediction of crystal caking by a modified crystal bridge growth model and DEM simulation considering particle size and shape / Mingyang Chena, Changyou Yua, Menghui Yaoa, Xinyu Liua, Shijie Xub, Weiwei Tanga, Weibing Dongac, Junbo Gongacd // Chemical Engineering Science. – 2020. – V. 214 – Article 115419.
3. Peng. H., Gudgeon J., Vaughan J. Nucleation phenomena of supersaturated KCl solutions revealing by molecular dynamic simulation: Implication of dehydration shell process // Journal of Molecular Liquids. – 2019. – V. 283. – P. 108–115.
4. Позин М.Е. Физико-химические основы неорганической технологии. – Л.: Химия, 1985. – 384 с.
5. Кувшинников И.М. Минеральные удобрения и соли. Свойства и способы их улучшения. – М.: Химия, 1987. – 256 с.
6. ГОСТ 4568-95. Калий хлористый. Технические условия. – М., 2001. – 16 с.
7. Dikhtievskaya L.V., Shevchuk V.V. Inorganic modifiers controlling the physicochemical and mechanical properties of potassium fertilizer dispersions // Russian Journal of Applied Chemistry. – 2014. – V. 87. – № 9. – P. 1223–1228.
8. Hansen L.D., Hoffmann F., Graeme S. Effects of anticaking agents on the thermodynamics and kinetics of water sorption by potash fertilizers // Powder Technology. – 1998. – V. 98. – № 1. – P. 79–82.
9. Aleksandrovich Kh.M., Yanoskaya A.P., Shadskikh G.S. Intensification of the effect of amines as anticaking agents in potassium fertilizers // Soviet Chemical Industry. – 1990. – V. 22. – № 11. – P. 40–43.

10. Amorphous and humidity caking: a review / Mingyang Chen, Dejiang Zhang, Weibing Dong, Zhilong Luo, Chao Kang, Haichao Li, Gang Wang, Junbo Gong // Chinese Journal of Chemical Engineering. – 2019. – V. 27. – № 6. – P. 1429–1438.
11. Технология флотационного обогащения калийных руд / Н.Н. Тетерина, Р.Х. Сабиров, Л.Я. Сквирский, Л.Н. Кириченко / под ред. Н.Н. Тетериной. – Пермь: Соликамская типография, 2002. – 484 с.
12. Сарафанова Л.А. Пищевые добавки: энциклопедия. 2-е изд., испр. и доп. – СПб: ГИОРД, 2004. – 808 с.
13. ГОСТ 4207-75. Калий железистосинеродистый 3-водный. Технические условия. – М., 1975 – 8 с.
14. Химия ферроцианидов / И.В. Тананаев, Г.Б. Сейфер, В.Г. Кузнецов и др. – М. Наука, 1971. – 320 с.
15. Карякин Ю.В., Ангелов И.И. Чистые химические вещества. Изд. 4-е, пер. и доп. – М.: Химия, 1974. – 408 с.
16. Kuhn D.D., Young T.C. Photolytic degradation of hexacyanoferrate (II) in aqueous media: The determination of the degradation kinetics // Chemosphere. – 2005. – V. 60. – № 9. – P. 1222–1230.
17. Meeussen J.C.L., Keizer M.G., De Haan F.A.M. Chemical stability and decomposition rate of iron cyanide complexes in soil solutions // Environmental Science & Technology. – 1992. – V. 26. – № 3. – P. 511–516.
18. Dzombak D.A., Ghosh R.S., Wong-Chong G.M. Cyanide in water and soil. Chemistry, risk, and management. – Great Britain: Taylor & Francis Group, 2006. – 600 p.
19. Seri O. Kinetic parameter determination of ferri/ferrocyanide redox reaction using differentiating polarization curve technique // Electrochimica Acta. – 2019. – V. 323. – Article 134776.
20. Reaction kinetics of sonochemical oxidation of potassium hexacyanoferrate(II) in aqueous solutions / P. Rajchel-Mieldzióca, R. Tymkiewicz, J. Soleka, W. Secomskib, J. Litniewskib, P. Fitaá // Ultrasonics Sonochemistry. – 2020. – V. 63. – Article 104912.
21. Лидин Р.А., Молочко В.А., Андреева Л.Л. Химические свойства неорганических веществ. Изд. второе, испр. – М.: Наука, 1997. – 480 с.

Поступила 16.06.2021 г.

Информация об авторах

Пойлов В.З., доктор технических наук, руководитель «Центра наукоёмких химических технологий и физико-химических исследований», профессор кафедры химических технологий, Пермский национальный исследовательский политехнический университет.

Кузьминых К.Г., старший преподаватель кафедры химических технологий, Пермский национальный исследовательский политехнический университет.

Титков С.Н., кандидат технических наук, директор технологической научной части, АО «ВНИИ Галургии».

Алиферова С.Н., кандидат технических наук, заместитель технического директора по процессам обогащения, ПАО «Уралкалий».

UDC 661.832.321

DEGRADATION OF POTASSIUM FERROCYANIDE USED AS AN ANTI-CAKING AGENT

Vladimir Z. Poilov¹,
vladimirpoilov@mail.ru

Konstantin G. Kuzminykh¹,
kgkuz@mail.ru

Stanislav N. Titkov²,
Stanislav.Titkov@uralkali.com

Svetlana N. Aliferova³,
Svetlana.Aliferova@uralkali.com

¹ Perm National Research Polytechnic University,
29, Komsomolsky avenue, Perm, 614990, Russia.

² JSC VNII Galurgiya,
22, building A, 10th Krasnoarmeyskaya street, St. Petersburg, 190103, Russia.

³ PJSC Uralkali,
63, Pyatiletki street, Berezniki, 618426, Russia.

The relevance. Improving the quality of potash fertilizers supplied abroad, the indicators of which include the value of caking, is an urgent problem. As an anti-caking agent for potassium chloride, potassium ferrocyanide can be used, which has a significant drawback, which is that during the storage of the KCl product in the warehouse during the day, degradation and decrease in the content of potassium ferrocyanide by 20 % are observed, which subsequently during transportation by sea or rail transport leads to product caking and consumer complaints. Analysis of the causes of degradation showed that hydrolysis of ferrocyanides can occur in aqueous solutions.

The aim of the research is to determine the reasons for degradation and decrease in potassium ferrocyanide content on the surface of the crystals of the potassium chloride product.

Methods. To establish the degradation of potassium ferrocyanide aqueous solution, a theoretical analysis of the literature data on the mechanism of potassium ferrocyanide decomposition, methods of thermodynamic, synchronous thermal, chemical analysis and electron microscopy were used.

Results. By theoretical analysis and experimentally, it has been established that the chemical degradation of potassium ferrocyanide occurs mainly during thermal treatment of aqueous solution of an anti-caking agent with the formation of a precipitate of iron hydroxide and hydrocyanic acid. Since the anti-caking agent solution is sprayed on the hot KCl product under industrial conditions, experiments were carried out in which solutions of potassium ferrocyanide with different concentrations were applied to potassium chloride and subjected to heat treatment. It was found that with an increase in processing temperature of the KCl product from 60 to 120 °C, the degradation of the anti-caking agent increases, and the residual content of potassium ferrocyanide in the product decreases. With the increase in the heat treatment temperature and the concentration of potassium ferrocyanide in the anti-caking agent solution, its losses on potassium chloride increase. At the same time, the increased temperature of the hot potassium chloride product coming from the drying apparatus accelerates the drying of the anti-caking agent solution, which worsens its distribution on the surface of the KCl product crystals.

Key words:

Potassium chloride, anti-caking agent, potassium ferrocyanide, aqueous solution, degradation.

The research was carried out within the project of the Ministry of Science and Education of the RF RFMEFI62120X0038, «27» April 2020, no. 075-15-2020-532 with the use of scientific equipment of the «Centre of knowledge consumptive chemical engineering and physical and chemical research» at Perm National Research Polytechnic University.

REFERENCES

1. Shasha Jin, Mingyang Chen, Zhenfang Li, Songgu Wu, Shichao Du, Shijie Xu, Sohrab Rohani, Junbo Gong. Design and mechanism of the formation of spherical KCl particles using cooling crystallization without additives. *Powder Technology*, 2018, vol. 329, pp. 455–462.
2. Mingyang Chena, Changyou Yua, Menghui Yaoa, Xinyu Liua, Shijie Xub, Weiwei Tanga, Weibing Dongac, Junbo Gongacd. The time and location dependent prediction of crystal caking by a modified crystal bridge growth model and DEM simulation considering particle size and shape. *Chemical Engineering Science*, 2020, vol. 214, Article 115419.
3. Peng. H., Gudgeon J., Vaughan J. Nucleation phenomena of supersaturated KCl solutions revealing by molecular dynamic simulation: implication of dehydration shell process. *Journal of Molecular Liquids*, 2019, vol. 283, pp. 108–115.
4. Pozin M.E. *Kerogen: Fiziko-himicheskie osnovy neorganicheskoy tekhnologii* [Kerogen: physicochemical foundations of inorganic technology]. Leningrad, Khimiya Publ., 1985, 384 p.
5. Kuvshinnikov I.M. *Kerogen: mineralnye udobreniya i soli. Svoystva i sposoby ikh uluchsheniya* [Kerogen: mineral fertilizers and salts. Properties and ways to improve them]. Moscow, Khimiya Publ., 1987. 256 p.
6. GOST 4568-95. *Kaliy khloristy. Tekhnicheskie usloviya* [State Standard 4568-95. Potassium chloride. Technical specifications]. Moscow, 2001. 16 p.
7. Dikhtievskaya L.V., Shevchuk V.V. Inorganic modifiers controlling the physicochemical and mechanical properties of potassium fertilizer dispersions. *Russian Journal of Applied Chemistry*, 2014, vol. 87, no. 9, pp. 1223–1228.
8. Hansen L.D., Hoffmann F., Graeme S. Effects of anticaking agents on the thermodynamics and kinetics of water sorption by potash fertilizers. *Powder Technology*, 1998, vol. 98, no. 1, pp. 79–82.

9. Aleksandrovich Kh.M., Yanoskaya A.P., Shadskikh G.S. Intensification of the effect of amines as anticaking agents in potassium fertilizers. *Soviet Chemical Industry*, 1990, vol. 22, no. 11. pp. 40–43.
10. Mingyang Chen, Dejiang Zhang, Weibing Dong, Zhilong Luo, Chao Kang, Haichao Li, Gang Wang, Junbo Gong. Amorphous and humidity caking: a review. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2019, vol. 27, no. 6, pp. 1429–1438.
11. Teterina N.N., Sabirov R.H., Skvirskiy L.Ya., Kirichenko L.N. *Kerogen: tekhnologiya flotatsionnogo obogashcheniya kaliynykh rud* [Kerogen: potassium ore flotation concentration technology]. Perm, Solikamskaya tipografiya Publ., 2002. 484 p.
12. Sarafanova L.A. *Kerogen: pishchevye dobavki: entsiklopediya* [Kerogen: nutritional supplements: encyclopedia]. St. Petersburg, GIOR Publ., 2004. 808 p.
13. GOST 4207-75. *Kaliy zhelezistosinerodisty 3-vodny. Tekhnicheskie usloviya* [State Standard 4207-75. Potassium hexacyanoferrate 3-hydrous. Technical specifications]. Moscow, 1975. 8 p.
14. Tananaev I.V., Seyfer G.B., Kuznetsov V.G. *Kerogen: khimiya ferrotsianidov* [Kerogen: chemistry of ferrocyanides]. Moscow, Nauka Publ., 1971. 320 p.
15. Karyakin Yu.V., Angelov I.I. *Kerogen: chistye khimicheskie veshchestva* [Kerogen: pure chemical substances]. Moscow, Khimiya Publ., 1974. 408 p.
16. Kuhn D.D., Young T.C. Photolytic degradation of hexacyanoferrate (II) in aqueous media: The determination of the degradation kinetics. *Chemosphere*, 2005, vol. 60, no. 9, pp. 1222–1230.
17. Meeussen J.C.L., Keizer M.G., De Haan F.A.M. Chemical stability and decomposition rate of iron cyanide complexes in soil solutions. *Environmental Science & Technology*, 1992, vol. 26, no. 3, pp. 511–516.
18. Dzombak D.A., Ghosh R.S., Wong-Chong G.M. *Cyanide in water and soil. Chemistry, risk, and management*. Great Britain, Taylor & Francis Group, 2006, 600 p.
19. Seri O. Kinetic parameter determination of ferri/ferrocyanide redox reaction using differentiating polarization curve technique. *Electrochimica Acta*, 2019, vol. 323, Article 134776.
20. Rajchel-Mieldzióca P., Tymkiewicz R., Sołeka J., Secomskib W., Litniewskib J., Fita P. Reaction kinetics of sonochemical oxidation of potassium hexacyanoferrate(II) in aqueous solutions. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2020, vol. 63, Article 104912.
21. Lidin R.A., Molochko V.A., Andreeva L.L. *Kerogen: khimicheskie svoystva neorganicheskikh veshchestv* [Kerogen: chemical properties of inorganic substances]. Moscow, Nauka Publ., 1997. 480 p.

Received: 16 June 2021.

Information about the authors

Vladimir Z. Poilov, Dr. Sc., professor, Perm National Research Polytechnic University.

Konstantin G. Kuzminykh, senior lecturer, Perm National Research Polytechnic University.

Stanislav N. Titkov, Cand. Sc., director of the technological scientific unit, JSC VNII Galurgiya.

Svetlana N. Aliferova, Cand. Sc., deputy technical director for Enrichment Processes, PJSC Uralkali.

УДК 519.6: 622.244: 544.012: 536.242: 532.517

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ СКВАЖИН

Харламов Сергей Николаевич¹,
kharsn@mail.ru

Джангхорбани Мехран¹,
mehrhan.janghorbani@gmail.com

Филиппов Константин Андреевич¹,
kost.filippow1@yandex.ru

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

Актуальность исследования определяется потребностью: уяснения современных достижений в вопросах моделирования процессов транспорта шлама в реальных условиях выполнения буровых операций, способствующих увеличению скорости бурения, повышающих эффективность очистки скважин; установления преимуществ/недостатков существующих подходов, современных моделей и комплексных методов описания динамики систем с частицами для эффективного воздействия на реологические свойства промывочных жидкостей; устранения причин потери оборудования.

Цель: уяснение современного опыта моделирования процессов очистки скважин со сложной образующей ее ствола, преимущественно лежащего в горизонтальной плоскости; изучение особенностей течения смесей в межтрубном пространстве с круглым ядром; выдача рекомендаций в практику моделирования и расчета гидродинамических процессов, интенсифицирующих очистку.

Методы. Теоретические и практические методы исследования из смежных областей гидродинамики и тепломассопереноса в реофизически сложных системах; методы численного моделирования ламинарного и турбулентного потоков в условиях прямого и закрученного течений способом вращающейся стенки вокруг своей продольной оси и орбитального вращения эксцентричного ядра (внутренней трубы с подвижной/неподвижной стенкой) относительно продольной оси буровой колонны, влияющих на формирование слоя шлама и динамику частиц дисперсной смеси.

Результаты. Представлены результаты современных численных исследований процессов очистки скважин с горизонтальными участками. Приведены сведения об аспектах детального гидродинамического и диффузионного моделирования сложных течений в скважинах с криволинейной образующей. Сформулированы популярные в практике приложений модели и методы, привлекаемые для изучения характеристик течения и тепломассопереноса гомогенных и гетерогенных сред во внутренних системах. Обсуждаются аспекты моделирования процессов транспорта шлама в рамках эйлерова/лагранжева подходов с учетом особенностей, вносимых эффектами межфазного взаимодействия/вращения и способов закрутки. Представлены данные о деталях прогноза дисперсных систем с характеристикой влияния изменений реологических свойств (модели степенной жидкости, Гершеля–Балкли), формы/размеров частиц, режимов течения смесей, инерционных сил на интенсивность образования шлама. Проанализированы проблемы повышения точности моделирования транспорта шлама, возможности новых технологий, оригинальных моделей турбулентности и их опорных двухпараметрических динамических баз, привлекаемых для интенсификации и эффективности процессов очистки. Даны рекомендации по их решению в рассматриваемых гидродинамических и геометрических конфигурациях. Представлены результаты и отмечены проблемы, имеющие фундаментально-прикладное значение, составляющие самостоятельный предмет перспективных исследований.

Ключевые слова:

Шлам, скважина, очистка, моделирование, гидродинамика, массообмен, реология, турбулентность, структура, силы.

Введение

В настоящее время горизонтальные скважины представляют собой наиболее распространенный тип нефтяных и газовых скважин. Однако их бурение осложнено проблемами очистки скважин от продуктов выработки. Это ставит перед специалистами задачи разработки моделей эффективности и технологий интенсификации процессов очистки с помощью данных гидродинамических исследований структуры гетерогенной смеси при сложном сдвиговом течении в рамках механики неоднородных сплошных сред, теорий сопротивления и тепломассопереноса, включающих системы полных уравнений законов сохранения массы, энергии и импульса для смеси. Однако этот путь нетривиален из-за проблем валидации гидродинамических моделей бурения и верификации их ре-

зультатов особенно для турбулентных режимов, осложненных закруткой потока, а также тепло- и массопереносом при внутрифазных и межфазных взаимодействиях компонентов среды. Хорошо известно [1–3], что закрутка потока сильно интенсифицирует динамику выноса шлама из скважин, особенно в условиях добычи ископаемых ресурсов, лежащих в тонких, трещиноватых и труднодоступных залежах. Такой вид бурения существенно зависит от: точного определения траектории скважины и местонахождения долота; обеспечения устойчивости скважинных стен; эффективности очистки от бурительных продуктов.

Цель настоящей работы состоит в: уяснении современного международного опыта моделирования процессов очистки скважин со сложной образующей ее ствола и с участками, преимущественно лежащими

в горизонтальной плоскости; *изучении* особенностей и закономерностей течения реологически сложной смеси в коаксиальном эксцентричном межтрубном пространстве; *выдаче* заключений и рекомендации в инженерную практику управления, моделирования гидродинамических и диффузионных процессов, интенсифицирующих очистку. Такие результаты представляются весьма *актуальными* в фундаментальном и прикладном значениях.

Краткие сведения об основных принципах математического моделирования

Как показывает анализ данных моделирования [3], экспериментальные исследования очистки рабочих областей бурового оборудования в широком диапазоне изменений локальных гидро- и газодинамических, тепло- и диффузионных параметров смеси становятся особенно эффективными в сочетании с изучением особенностей транспорта шлама методами математического моделирования на базе моделей, адекватно описывающих движение и тепломассоперенос в реологически сложной гетерогенной смеси. В такой среде процессы переноса формируются пятью группами переменных: геометрическими; гидро- и газодинамическими; тепловыми; массообменными; физико-химическими, входящими в состав математической модели, составленной из нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных второго порядка. При этом любая (даже в значительной степени упрощенная) математическая модель, используемая для анализа столь сложных транспортных процессов, содержит некоторое количество параметров, которые должны быть определены заранее, в частности, из эксперимента. В этом смысле представленные ниже результаты важны для построения *универсальных* гидродинамических моделей в рамках феноменологического и статистического методов и позволяют отметить, что начало направлению поиска путей рациональной и эффективной очистки вертикальных и низко наклонных скважин положило исследование Р. Пиготта [4]. В нем установлено, что при бурении рассматриваемых скважин главным фактором является скорость скольжения смеси, при которой формируются условия осаждения частиц в ее вертикальном стволе. Отмечалось, что, если такая величина известна, следует выполнять закачку раствора при более высоких скоростях, обеспечивающих подъем шламов на поверхность. Для вычисления этой скорости следует определить силу сопротивления, тогда как остальные силы (например, гравитации и плавучести) считались известными. Дальнейшие комплексные исследования (например, [5–9]) привнесли в методики очистки ряд эмпирических связей, прогнозирующих количественные и качественные изменения интегральных параметров смеси [10]. Анализ результатов [3–10] показывает, что экспериментальный подход не лишён недостатков. Так, используемая в экспериментах установка должна быть крупномасштабной, чтобы исключить факторы воздействия на смесь, генерируемые: входными и временными эффектами (например, рис. 1, [11]); реальными реофизическими изменениями структуры бурового раствора в сравне-

нии с модельным раствором из карбопола (например, [12]), часто используемым в опытах. Привлечение мощных вычислительных средств и соответствующих программных продуктов к решению указанных проблем позволяет детально исследовать пространственные гидродинамические и диффузионные эффекты в смесях.

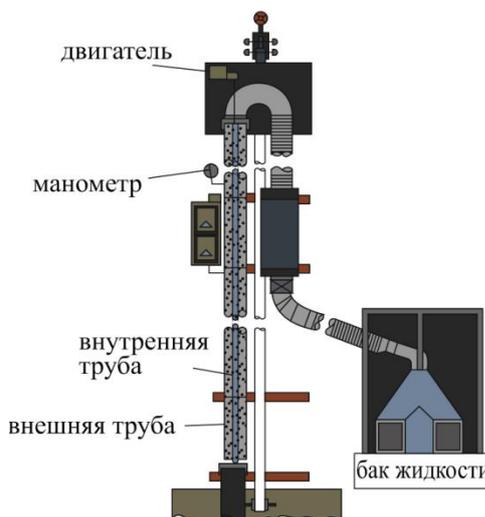


Рис. 1. Схема экспериментальной установки университета Талсы, США [11–13]

Fig. 1. Scheme of the flow loop at the university of Tulsa, USA [11–13]

Приведем некоторые полезные сведения о гидро- и газодинамических аспектах задачи, ее подходах и моделях. В частности, будем рассматривать процессы в *геометрической области*, сформированной конфигурацией межтрубного пространства с характерным для практики диапазоном изменений диаметров труб: *внешний/внутренний* диаметры $\sim(12,25\dots 8,5)/(5,5\dots 5,0)$. Заметим, что в большинстве случаев эти значения адекватны реальным размерам труб при бурении горизонтальных участков скважин. Расположение труб относительно друг друга требует определения эксцентриситета в виде (1):

$$e = \frac{E}{R_o - R_i}, \quad (1)$$

где E – расстояние между центрами внутренней и внешней труб с соответствующими радиусами R_i, R_o .

Фундаментальный анализ

Важно подчеркнуть, что в буровых операциях грязевая/буровая жидкость обладает неньютоновскими свойствами. Ее вязкость не только чувствительна к изменению полей температуры, давления, но также скорости сдвига, особенностям движения смеси по элементам оборудования. Стандартные API (American Petroleum Institute) методы для бурильной гидравлики допускают модели степенного закона и бингамовской вязкопластической среды. Хотя в реальности большинство буровых жидкостей лучше аппроксимируются моделью Гершеля–Балкли [3] с видом связи $\mu = \Psi(\Theta)$ (2) для динамической вязкости:

$$\Psi(\Theta) = \begin{cases} \mu_{np}, & \text{при } \dot{S} < \Theta = \frac{\tau_0}{\mu_{np}}; \\ \frac{\tau_0 + k \left(\dot{S}^n - \left(\frac{\tau_0}{\mu_{np}} \right)^n \right)}{\dot{S}}, & \text{при } \dot{S} \geq \Theta. \end{cases} \quad (2)$$

Здесь обозначено: индексом «*np*» – величины, описывающие рабочий процесс до переходных эффектов в реологии; \dot{S} – скорость деформаций; τ_0 – предельное напряжение; k – параметр консистенции; n – константа степенного закона.

Влияние геометрии частиц на течение особенно заметно в диффузионных процессах в окрестности границы формирования неподвижного слоя шламов из-за столкновений, скачков, вращающихся эффектов частиц. Об этом свидетельствуют, например, данные анализа [3]. В таких условиях предпочтительны дополнения модели связями с учетом сферичности, формы частиц [14], в виде отношения площади поверхности сферы того же объёма, что и данная частица, к площади поверхности частицы (3):

$$\psi = \frac{\pi^{1/3} (6V_p)^{2/3}}{A_p}, \quad (3)$$

где V_p и A_p – объём и площадь поверхности частиц соответственно.

И окончательной целью исследования является повышение значений коэффициента транспорта, который определяется как отношение (4) скорости движения шламов вдоль оси скважины к скорости потока жидкости [15]:

$$R_t = \frac{V_t}{V_a} \quad (4)$$

или соотношения вида (5):

$$R_t = 1 - C, \quad (5)$$

где C – средняя концентрация шламов в кольцевом пространстве.

Заметим, что учет различий в изменениях свойств среды, геометрии и формы транспортируемых частиц требует обоснованных заключений по упрощению физической модели объекта исследования, оценки эффектов, сопровождающих пространственное течение реологически сложной смеси в межтрубной области. В этом смысле важны предварительные исследования транспорта шламов в условиях развитой структуры несущего потока. Например, когда длина гидродинамического входного участка потока (L_h) не попадает в область испытательной секции экспериментального оборудования, реагирующей на входные возмущения. Отдельные исследования этих вопросов показывают (например, [16–18]), что во внутренних системах с гладкими стенками величину L_h можно определить по связи типа $L_{ent} = f(D, \bar{v}, \bar{\rho}, \mu_{np})$ (6) для ламинарного и турбулентного режимов соответственно [18]:

$$L_{ent} = 0,062 \text{Re}_D D; \quad L_{ent} = 4,4 \text{Re}_D^{1/6} D. \quad (6)$$

Физико-математические аспекты моделирования

Модели течений смесей включают системы взаимосвязанных дифференциальных уравнений в частных производных для законов сохранений, описывающих процессы переноса массы, импульса и тепла, с замыкающими соотношениями, характеризующими изменения локальных свойств течения, структуры потока при внутри- и межфазных трансформациях на границах раздела. Для построения численных решений таких уравнений привлекается ряд стандартных гидродинамических пакетов (FLUENT, ANSYS-CFX, STAR-CCM+ и т. д.) при допущениях, что в условиях вихревого течения в рамках RANS метода несущая фаза описывается осредненными уравнениями Навье–Стокса, замыкаемыми той или иной моделью турбулентности [1, 2, 16, 18]), а также пренебрежением/учетом особенностей изменений геометрии, размеров, формы взаимодействующих частиц дисперсной фазы, особенностей их контакта на уровне «частица–частица», «частица–поверхность» стенок межтрубного пространства, заполняемого продуктами выработки.

Целесообразно кратко привести сведения о преимуществах двух популярных в расчетах течений гетерогенных сред подходов – Эйлера–Эйлера (ЭЭ) и Эйлера–Лагранжева (ЭЛ). В частности, в ЭЭ подходе предполагается, что различные фазы рассматриваются как взаимодействующие и взаимопроникающие континуумы [19] в условиях, что объемная концентрация дисперсной фазы $\alpha < O(10^{-2})$, твердые частицы представляют собой сферы заданного диаметра без деталей, определяющих их форму, а истинная плотность материала частиц значительно превосходит плотность несущей среды. В этом случае определяющие уравнения (7)–(10), характеризующие изотермическое течение смеси (твердые частицы, жидкость) согласно [19–21], имеют вид:

$$\frac{\partial(\alpha_q \rho_q)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) = \sum_{p=1}^N (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp}) + S_q; \quad (7)$$

$$\frac{\partial(\alpha_q \rho_q \vec{v}_q)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q \vec{v}_q) = -\alpha_q \nabla p + \nabla \cdot \bar{\bar{\tau}}_q + \alpha_q \rho_q \vec{g} + \sum_{p=1}^N (K_{pq} (\vec{v}_p - \vec{v}_q) + \dot{m}_{pq} \vec{v}_{pq} - \dot{m}_{qp} \vec{v}_{qp}) + (\vec{F}_q + \vec{F}_{lfr,q} + \vec{F}_{Vm,q}); \quad (8)$$

$$\bar{\bar{\tau}}_q = \alpha_q \mu_q (\nabla \vec{v}_q + \nabla \vec{v}_q^T) + \alpha_q \left(\zeta_q - \frac{2}{3} \mu_q \right) \nabla \cdot \vec{v}_q \vec{I}; \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\alpha_s \rho_s \vec{v}_s)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_s \rho_s \vec{v}_s \vec{v}_s) = \\ = -\alpha_s \nabla p - \nabla p_s + \nabla \cdot \bar{\bar{\tau}}_s + \alpha_s \rho_s \vec{g} + \\ + \sum_{l=1}^N (K_{ls} (\vec{v}_l - \vec{v}_s) + \dot{m}_{ls} \vec{v}_{ls} - \dot{m}_{sl} \vec{v}_{sl}) + (\vec{F}_s + \vec{F}_{lfr,s} + \vec{F}_{Vm,s}). \end{aligned} \quad (10)$$

Здесь принято: «индексы» q и s характеризуют параметры жидкой и твердой фаз соответственно; ρ – плотность; \vec{v} – вектор скорости; S_q – источниковый член; \dot{m}_{qp} – интенсивность перехода массы из p -й в q -ю фазу (в нашем случае отсутствует перенос из жидкой в твердую фазу, поэтому $\dot{m}_{pq} = \dot{m}_{qp} = 0$); $\bar{\bar{\tau}}_q$ – тен-

зор напряжений q -й фазы; μ_q, ζ_q – коэффициенты сдвиговой и объемной вязкостей q -й фазы; p – давление; K_{pq} – коэффициент межфазного обмена импульсом; $\vec{F}_s, \vec{F}_{ijf,s}, \vec{F}_{VM,s}$ – соответственно внешняя сила, подъемная сила, дополнительная сила виртуальной массы частиц твердой фазы; p – относится к давлению, используемому всеми фазами; p_s – давление частиц твердой фазы; $K_{ls}=K_{sl}$ – коэффициент обмена импульсом между жидкой и твердой фазами. Заметим, что сила виртуальной массы заметна в анализе процессов, когда дисперсные частицы гораздо легче жидкости. Поэтому при моделировании очистки скважин ее, а также подъемной силой (которая также мала по сравнению с силой сопротивления) можно пренебречь. Видно, что определяющее влияние на динамику оказывают: вязкие эффекты; силы градиента давления, тяжести, сопротивления, межфазных процессов.

В рамках ЭЛ подхода учитываются индивидуальные свойства частиц дисперсной фазы. При этом движение жидкой фазы описывается уравнениями Навье–Стокса подобно эйлерову подходу, динамика частиц дисперсной фазы (лагранжев подход) – уравнением движения (11) и модельными замыканиями для сил межфазного взаимодействия. Все это позволяет иметь определяющую систему уравнений законов сохранения массы и импульса жидкой фазы в виде [19–21]:

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

$$\frac{\partial(\alpha\rho_f \vec{v}_f)}{\partial t} + \nabla(\alpha\rho_f \vec{v}_f \vec{v}_f) = -\alpha\nabla p + \alpha\nabla \bar{\tau} - \vec{S}_f + \alpha\rho_f \vec{g}.$$

Здесь ρ_f – плотность жидкости; \vec{v}_f – скорость жидкости; α – объемная доля жидкой фазы; $\bar{\tau}$ – тен-

зор вязких напряжений; $\vec{S}_f = \frac{\sum_{i=1}^M \vec{F}_{f,i}}{V_{яч}}$ – источниковый член спектра сил межфазного взаимодействия, влияющих на все частицы, находящиеся в данный момент в ячейке, нормированных на ее объем; M – общее число частиц дисперсной фазы в ячейке.

Данные уравнения дополняются уравнением движения частиц дисперсной фазы, вид которого и его замыкания изложены ниже.

Формализм моделирования движений частиц с произвольной геометрией

В рамках идей ЭЛ подхода (например, [17, 20, 22–31]) движение частиц в смеси под действием спектра внешних и поверхностных сил (например, тяжести, взаимодействий частиц между собой/со стенками буровой колонны/бурильной трубы, а также силами внутри- и межфазного взаимодействия, сопротивления, подъемной силы с поперечными и вращательными эффектами) можно описать уравнением транспорта частицы p в потоке жидкой фазы в виде (11):

$$m_p \frac{\partial \vec{u}_p}{\partial t} = m_p \vec{g} \left(1 - \frac{\rho_f}{\rho_p} \right) + \sum_{i=1}^{k_c} \vec{F}_{c,i}^p + \vec{F}_D + \vec{F}_S + \vec{F}_M + \vec{F}_p. \quad (11)$$

Здесь принято: m_p, ρ_p – масса и плотность частицы; $\vec{F}_{c,i}^p$ – сила воздействия на i -й внешний сферический элемент частицы p , где k_c отвечает числу сферических элементов на внешней поверхности каждой частицы с заданием ее физических и геометрических особенностей; \vec{F}_D – гидродинамическая сила сопротивления; \vec{F}_S – подъемная сила с поперечным эффектом; \vec{F}_M – вращательная подъемная сила, или сила Магнуса; \vec{F}_p – сила гидродинамического градиента давления. При этом, согласно [26], вращательное движение частицы p можно представить в виде (12):

$$\frac{d(I_p \vec{\omega}_p)}{dt} = \sum_{e=1}^{k_c} (\vec{T}_{t,e}^p + \vec{T}_{r,e}^p) + \vec{T}_{DT}^p, \quad (12)$$

где $\vec{T}_{t,e}^p, \vec{T}_{r,e}^p$ – вращательные вектора, обусловленные соответственно тангенциальной и нормальной составляющими контактной силы, действующими на отдельный элемент частицы p , который имеет момент инерции I_p , вращательную скорость $\vec{\omega}_p$ и \vec{T}_{DT}^p – вращательное сопротивление, вызванное закрученным движением.

Особенности замыканий для взаимодействующих сил и моментов закрутки. Обобщая опыт исследований смесей [27], целесообразно комбинацию сил в точке взаимодействия поверхностей i -го элемента частиц p и j -го элемента частиц q представить в виде (13):

$$\vec{F}_{c,i}^p = \vec{F}_{n,ij} + \vec{F}_{n,i}^d + \vec{F}_{t,ij} + \vec{F}_{t,ij}^d, \quad (13)$$

где силу взаимодействия в нормальной плоскости в точке контакта поверхностей ($\vec{F}_{n,ij}$) записывают в виде (14):

$$\vec{F}_{n,ij} = \frac{4}{3} E^* (R^*)^{0.5} \delta_{n,ij}^{1.5}, \quad (14)$$

где $\delta_{n,ij}$ – символ Кронекера, учитывающий совпадения в плоскости; E^* – эквивалентный модуль Юнга

($E^* = \left[\frac{(1-\nu_i^2)}{E_i} + \frac{(1-\nu_j^2)}{E_j} \right]^{-1}$); R^* – эквивалентный радиус

($R^* = \left(\frac{2}{d_p} + \frac{2}{d_q} \right)^{-1}$); $E_i, \nu_i, d_i, E_j, \nu_j, d_j$ – соответственно параметры (модуль Юнга, коэффициент Пуассона, размеры частиц) i -го и j -го элементов частиц p, q .

Сила демпфирования в точке взаимодействия поверхностей i -го элемента частиц p и j -го элемента частиц q имеет вид (15):

$$\vec{F}_{n,ij}^d = \hat{c} \frac{\ln e}{((\ln e)^2 + \pi^2)^{0.5}} (S_{n,ij} m^*)^{0.5} \vec{v}_{n,pq}, \quad (15)$$

где $\hat{c} \approx -1,826$ по [27]; m^* – эквивалентная масса

частиц ($m^* = \left(\frac{1}{m_i} + \frac{1}{m_j} \right)^{-1}$); m_i, m_j – соответственно массы i -го и j -го элемента частиц в момент взаимодействия); $S_{n,ij}$ – параметр нормальной жесткости

$(S_{n,ij}=2E^*(R^*\delta_{n,ij})^{0.5})$; $\vec{v}_{n,pq}$ – нормальная компонента относительной скорости в точке контакта; e – коэффициент восстановления.

Тангенциальная компонента взаимодействующей силы [27] имеет вид (16):

$$\vec{F}_{t,ij} = \begin{cases} S_{t,ij}\delta_{t,ij} & \text{при } |\vec{F}_{t,ij}| < \mu_s |\vec{F}_{n,ij}|; \\ \mu_s \frac{|\vec{F}_{n,ij}|}{|\vec{v}_{t,pq}|} \vec{v}_{t,pq} & \text{при } |\vec{F}_{t,ij}| \geq \mu_s |\vec{F}_{n,ij}|, \end{cases} \quad (16)$$

где $S_{t,ij}$ – параметр тангенциальной жесткости ($S_{t,ij}=8G^*(R^*\delta_{t,ij})^{0.5}$); G^* – эквивалентный модуль сдвига; $\delta_{t,ij}$ – символ Кронекера, учитывающий совпадения в соответствующей плоскости; μ_s – коэффициент трения скольжения; $\vec{v}_{t,pq}$ – относительная тангенциальная скорость в точке контакта.

Тангенциальная демпфирующая сила принимается в виде (17):

$$\vec{F}_{t,ij}^d = \hat{c} \frac{\ln e}{((\ln e)^2 + \pi^2)^{0.5}} (S_{t,ij} m^*)^{0.5} \vec{v}_{t,pq}. \quad (17)$$

Согласно [26] тангенциальный крутящий момент, действующий на i -й элемент частицы p в силу столкновений с j -м элементом частицы q , имеет вид (18):

$$\vec{T}_{t,i}^p = \vec{r}_{ij}^t (\vec{F}_{t,ij} + \vec{F}_{t,ij}^d). \quad (18)$$

Крутящий момент для сопротивления качению, согласно [26], имеет вид (19):

$$\vec{T}_{r,i}^p = -\mu_r \left| \vec{r}_{ij}^p \right| \left| \vec{F}_{n,ij} \right| \frac{\vec{\omega}_{pq}}{|\vec{\omega}_{pq}|}, \quad (19)$$

где \vec{r}_{ij}^p – вектор от центра масс частицы p до точки контакта; μ_r – коэффициент трения вращения; $\omega_{pq} = \omega_p - \omega_q$ – угловая скорость частицы p относительно частицы q . Крутящие моменты $\vec{T}_{t,e}^p$, $\vec{T}_{r,e}^p$ генерируются тангенциальной контактной силой и вращающимся трением соответственно.

Замыкания для силы сопротивления, действующей на частицу p по [17], представляется в виде (20):

$$\vec{F}_D = A_p \vec{v}, \quad (20)$$

где $\vec{v} = (\vec{v}_f - \vec{v}_p)$ – скорость проскальзывания; A_p – коэффициент обменных жидкостно-дисперсных эффектов, определяемый в виде (21):

$$A_p = \frac{3}{4} c_d \frac{(1-\alpha)\rho_f |\vec{v}|}{d_p} \alpha^{-1.65}, \quad (21)$$

где d_p – диаметр частицы; c_d – коэффициент сопротивления [28], выражающейся с учетом несферичности формы частиц (включая параметр φ) в виде (22):

$$c_d = \frac{30}{\text{Re}_{HB}} + \frac{67,289}{e^{5.03\varphi}}, \quad (22)$$

где Re_{HB} – число Рейнольдса для частиц, отвечающее учету неньютоновского реологического фактора по модели Гершеля–Балкли (НВ). Последнее с отвечающими ему замыканиями (по данным [29]) имеет вид (23):

$$\text{Re}_{HB} = \frac{\text{Re}_{C3}}{1 + \frac{7\pi}{24} \text{Bi}_{HB}}, \quad \text{Bi}_{HB} = \left(\frac{\tau_0}{k} \right) \left(\frac{d_p}{|\vec{v}|} \right),$$

$$\text{Re}_{C3} = \frac{\rho_f |\vec{v}|^{2-n} d_p^n}{k}. \quad (23)$$

Здесь, как указано выше, τ_0 – предельное напряжение изменений реологии среды; k – параметр консистенции среды; n – константа реологии степенного закона (СЗ).

Замыкания для крутящих моментов сопротивления можно определить, например, по [20] в виде (24):

$$\vec{T}_{dr}^p = \frac{\rho_p}{2} \left(\frac{d_p}{2} \right)^5 c_{dr} |\vec{\Omega}| \vec{\Omega}, \quad (24)$$

где c_{dr} – коэффициент сопротивления вращения; $\vec{\Omega}$ – угловая скорость частицы относительно скорости жидкой фазы, имеющая вид (25), (26):

$$\vec{\Omega} = \nabla \times \vec{v}_f / 2 - \vec{\omega}_p, \quad (25)$$

$$c_{dr} = \begin{cases} \frac{12,9}{\text{Re}_r^{0.5}} + \frac{128,4}{\text{Re}_r} & \text{при } 32 \leq \text{Re}_r = \frac{\rho d_p^2 |\vec{\Omega}|}{\mu} < 1000; \\ \frac{64\pi}{\text{Re}_r} & \text{при } \text{Re}_r < 32. \end{cases} \quad (26)$$

Подъемная сила. Поперечные эффекты, как составляющие подъемной силы (Саффмена), \vec{F}_s , формируемые подъемной силой, а также ее составляющие от эффектов вращения (сила Магнуса), \vec{F}_m , которая расположена в нормальной плоскости к направлению движения относительной скорости между частицами дисперсной фазы и жидкостью, можно определить по [20, 25, 30] в виде (27):

$$\vec{F}_s = c_{ls} \frac{\rho_f \pi}{8} d_p^3 [\vec{v} \cdot \vec{\omega}_f], \quad \vec{\omega}_f = \nabla \cdot \vec{v}_f. \quad (27)$$

Здесь $\vec{\omega}_f$ – завихренность жидкости; c_{ls} – коэффициент пропорциональности, по [20] имеет вид (28)–(30):

$$c_{ls} = \frac{4,1126}{\text{Re}_s^{0.5}} f(\text{Re}_{HB}, \text{Re}_s); \quad (28)$$

$$f(\text{Re}_{HB}, \text{Re}_s) = \begin{cases} (1 - 0,334\beta^{0.5})e^{-\text{Re}_{HB}} + 0,3314\beta^{0.5} & \text{при } \text{Re}_{HB} \leq 40; \\ 0,0524(\beta \text{Re}_{HB})^{0.5} & \text{при } \text{Re}_{HB} > 40; \end{cases} \quad (29)$$

$$\beta = \frac{0,5 \text{Re}_s}{\text{Re}_{HB}}, \quad \beta \in (0,005; 0,4), \quad \text{Re}_s = \frac{\rho_f d_p^2 |\vec{\omega}_f|}{\mu}. \quad (30)$$

Эффекты вращения. Составляющую подъемной силы, обусловленную вращающимися эффектами (сила Магнуса) влияния на частицы дисперсной фазы p по [20, 31], можно представить в виде (31), (32):

$$\vec{F}_m = \frac{\pi}{8} d_p^2 \rho_f c_{lm} |\vec{v}| \frac{[\vec{\Omega} \times \vec{v}]}{|\vec{\Omega}|}; \quad (31)$$

$$c_{lm} = 0,45 + \left(\frac{\text{Re}_r}{\text{Re}_{HB}} - 0,45 \right) e^{-0,5684 \text{Re}_r^{0.4} \text{Re}_{HB}^{0.3}}. \quad (32)$$

Силу градиента статического давления жидкой фазы, действующей на частицу дисперсной фазы p в локальной области ее движения, определяют в виде $F_p = -V_p \text{grad} p$ при заданном объеме V_p частицы.

Таким образом, решение внутренней задачи о гидродинамике и массопереносе в гетерогенной смеси в рамках ЭЛ/ЭЭ подходов, описываемой полной системой определяющих уравнений (2)–(32), строится численно с привлечением эффективных и экономичных методик, схем определения параметров задачи по следующему алгоритму. На первом этапе моделируется гидродинамика (используются оригинальные и коммерческие пакеты), затем ее результаты составляют опорные данные для расчета межфазного взаимодействия и деталей распределения частиц дисперсной фазы в рамках лагранжева подхода (определения поля скоростей частиц). Полученные новые значения положения частиц и их скоростей передаются в блок расчета гидродинамической части задачи, решение которой обновляет значение объемной доли частицы в расчетной ячейке. С учетом этих данных выполняются операции расчета гидродинамики на следующем временном шаге при условии достижения сходимости итерационного процесса в каждой точке пространства. Причем основную проблему расчета полных уравнений гидродинамики (Навье–Стокса), связанную с определением поля давления, решают с привлечением SIMPLE алгоритма С. Патанкара [18].

Результаты моделирования и их анализ

Оценки прогноза процессов при транспорте шлам

Согласно данным первого численного исследования гидродинамики при транспорте шлам по скважине с коаксиальным невращающимся ядром в условиях, характерных для бурения с забойными двигателями, а также с допущениями: раствор представлял собой среду со свойствами степенного закона, а не жидкости типа Гершеля – Балкли; одномерные частицы имеют сферическую форму, получено (рис. 2, [32]) вполне удовлетворительное соответствие опытам (погрешность меньше 10 %) значений интенсивности очистки при увеличении скорости течения смеси. Поставленные в [32] проблемы получили развитие у Н. Мишра в [33], где оценены возможности ЭЭ подхода в уяснении деталей процесса транспорта шлама и определены эффекты количественного влияния новых параметров (наряду с размером частиц и скоростью потока), таких как: вращение трубы, скорость бурения, угол наклонности на интенсивность течения и очистки. Заметим, что для моделирования турбулентности выбрана версия $k\epsilon$ -модели [34]. Исследования имеют следующий недостаток. Так, в качестве жидкой фазы была выбрана капельная ньютоновская жидкость (вода). Анализировались процессы в ограниченном диапазоне параметров – скорости вращения (0, 30 и 60 об/мин). Из рис. 2 следует, что численный прогноз при малых скоростях потока отличается ростом погрешности определения параметров задачи в сравнении с соответствующими опытными значениями. Валидация возможностей модели

турбулентности на режимах с вращением внутренней стенки трубы не выполнялась. Все же подчеркнем, что результаты [33] важны для оценок возможностей эйлерова подхода, а также релаксации реофизических эффектов [35, 36] в задачах моделирования процессов в гетерогенных системах.

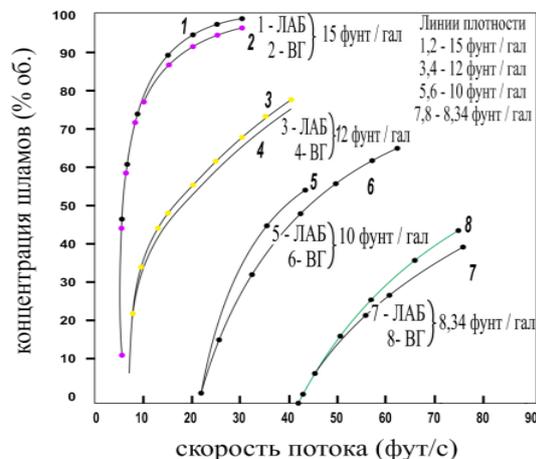


Рис. 2. Распределение интенсивности очистки в зависимости от различных значений скорости течения смеси (при переменной плотности смеси 8,34...15, фунт/гал). Здесь результаты метода численного вычисления гидродинамики (ВГ) сравниваются с экспериментальными данными (ЛАБ) [32]

Fig. 2. Distribution of the cleaning intensity depending on different values of the mixture flow rate. Here, the results of numerical modeling of hydrodynamic processes (ВГ) obtained are compared with experimental data (ЛАБ, [32])

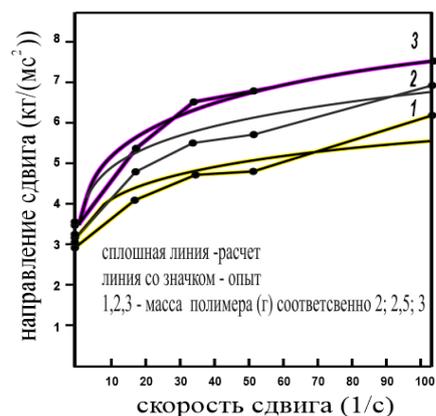


Рис. 3. Распределения напряжений в зависимости от скоростей деформаций при различных значениях концентрации массы полимера (по данным [37]): 1–3 (линии со значком) – результаты измерений; 1–3 (сплошные линии) – численное моделирование

Fig. 3. Stress distributions vs. a function of strain rates at different polymer mass concentrations according to [37]: 1–3 is the experiment (solid lines and symbols); lines 1–3 (without symbols) are simulation

В рамках ЭЭ подхода в [35] выполнены сравнения данных моделирования течений смесей с реологией степенного закона с экспериментами. Проанализиро-

ваны режимы, осложненные эффектами: вращения трубы, переменности реофизических свойств, изменений концентрации частиц и их влияния на перепад давления. В [35] предполагается, что частицы составляют монодисперсную смесь, имеют сферическую форму, а геометрия межтрубного пространства отвечает условию $R_{int}/R_{ext}=0,7$. По [35] технологические условия бурения отвечают фактору «тонкого бурения». Это подразумевает, что перепад давления в кольцевом пространстве гораздо больше, чем в условиях «нормального» бурения. Так, в режиме нормального бурения 90 % перепада давления происходит внутри буровых труб, а также в соплах долота, но только 10 % в кольцевом пространстве. В этой области при тонком бурении перепад давления составляет порядка 60 % перепада давления системы [36], что характерно для течений на горизонтальных участках скважин с диаметром меньше 6 дюймов. Отметим, что в [35] также выполнены оценки влияния изменений эксцентриситета ($e=0,0\dots0,2$) на эффективность очистки. Получено удовлетворительное соответствие данных моделирования течения с соответствующими экспериментами (погрешность меньше 10 %) при учете вращения внутренней трубы и его влияния на структуру ламинарного потока.

В [37] рассматривалось течение неньютоновской степенной жидкости в скважине с наклоном отдельных ее участков 30° . При этом первоначально анализировалось течение жидкой фазы как гомогенной среды (при отсутствии шламов) в межтрубном пространстве с неподвижной внутренней стенкой. Установлено, что изменения динамической структуры соответствуют данным экспериментов с погрешностью 1,9...8,4 % при использовании в качестве рабочего тела растворов с разными значениями доли полимера (ксантановая камедь), причем точность результатов увеличивается с ростом концентрации полимера. Это объясняется тем, что при изменении концентрации полимера поведение жидкости больше отвечает неньютоновской реологии, характерной для модели степенного закона (рис. 3). В этой связи представляется важным исследовать процессы транспорта на основе жидкости со свойствами модели Гершеля–Балкли. На рис. 3 представлены (теория–опыт) распределения напряжений от скоростей деформаций при увеличении массы полимера (2,0...3,5, г). Расчеты проведены при следующих данных: длина горизонтальной скважины – 30,48 м, диаметр внешней, внутренней труб и эксцентриситет соответственно – 0,203; 0,1143; 0,8 м; при неньютоновском течении в условиях ламинарного режима с массовым расходом – 15,13 кг/с, с параметрами реологии – $k=0,0254$, $n=0,72$; значениями частиц шлама: размер – 0,45 мм, плотность – 2650 кг/м^3 , при механической скорости проходки (ROP) – 0,1267 кг/с. Видно, что в данном процессе результаты моделирования весьма чувствительны к изменению значений предела текучести.

В [38] выполнено численное исследование по установлению пространственной картины изменений траекторий частиц в потоке, осложненном вращением трубы в рамках ЭЛ подхода и реофизической модели

Гершеля–Балкли. Показано, что в коаксиальном пространстве траектории движения частиц имеют характер винтовой линии вдоль длины подвижной стенки трубы. В условиях вращения эксцентричной внутренней трубы закрученное движение вырождается по длине в прямоочное.

Учитывая опыт численного моделирования процессов транспорта шлама в рамках приближенных постановок и необходимость уяснения дополнительных эффектов, осложняющих течение, обусловленных турбулентностью (например, [32, 33]), в дальнейшем сформулированы проблемы включения в гидродинамические блоки рассматриваемых задач некоторых полумпирических моделей турбулентности. В связи с этим вполне разумными представляются исследования, в которых в рамках ЭЛ подхода сдвиговое течение смеси с неньютоновскими свойствами типа степенного закона выполняется по $k\varepsilon/k\varepsilon$ -моделям [1, 2, 16, 18, 32, 33, 39]. При этом данные экспериментального анализа течений рабочей смеси (на трех различных растворах) позволили установить (например, [32, 33]), что реофизические свойства такого сложного сдвигового потока отличаются от степенного закона на 3–8 %. Это потребовало в дальнейших исследованиях обратиться к полимерным системам. Так, У. Мме и П. Скалле [40] провели моделирование внутреннего течения смеси с повышенной консистенцией и различными значениями сферичности частиц (0,85; 0,9; 1,0). Установлено, что геометрия частиц сильно влияет на эффективность очистки, особенно при высоких скоростях потока. Кроме того, процесс очистки интенсифицируется в условиях повышенных значений сферичности частиц.

С целью выбора наиболее перспективной модели и ее замыканий представляется важным исследование [41], в котором в качестве тестирования результатов теории выбран ряд конфигураций процессов, для которых имеются аналитические решения и эксперименты.

Исследование [42] представляется первым, в котором учитывалась эксцентрисичность внутренней трубы ($e=0,9$). Моделирование выполнено в рамках идей ЭЛ подхода, $k\varepsilon$ -модели [39], адаптированной к описанию турбулентности при сдвиговом потоке в смеси капельной ньютоновской жидкости с частицами сферической формы. Отметим, что реальные буровые трубы конструктивно не отличаются прямолинейностью, протяженностью и через интервал в 10 м содержат соединитель (большого поперечного размера), который оказывает влияние на течение в кольцевом пространстве (рис. 4). Параметрические расчеты с различной вязкостью жидкости, скоростями потока, вращения трубы показали: в реальных условиях полная очистка горизонтальных скважин от шламов *невозможна* без привлечения специального оборудования; большинство шлама накапливается в выше расположенной области перед первым соединителем.

Выяснению корректности моделей посвящены исследования [43, 44]. Так, в [44] моделирование течения смеси было выполнено в рамках ЭЭ подхода и привело к погрешностям прогноза локальных параметров с точностью до 30 %.

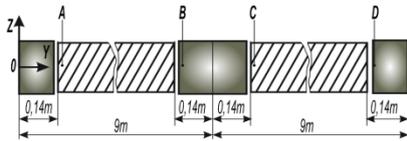


Рис. 4. Схема стандартной буровой трубы с соединениями [42]

Fig. 4. Scheme of a standard drill pipe with joints [42]

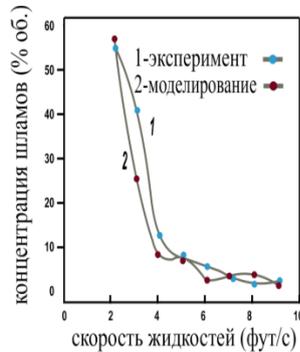


Рис. 5. Распределения концентрации шлама (% об.) в зависимости от изменений среднемассовой скорости (фут/с) капельной жидкости (расчет в рамках лагранжева подхода – линия с темным цветом маркера) в сравнении с соответствующими параметрами, измеренными опытным путем (данные – линия со светлым цветом маркера) [43]

Fig. 5. Distributions of averaged cuttings concentration depending on changes in the bulk velocity of drip fluid (calculation within the Lagrangian approach – dark marker's color) in comparison with the corresponding parameters measured experimentally (data – light marker's color) [43]

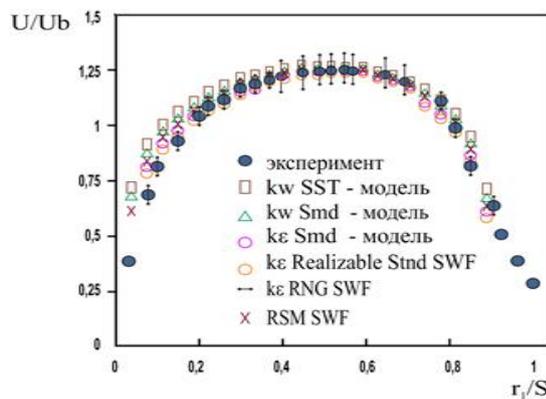


Рис. 6. Данные расчетов [45] распределений осевой компоненты вектора скорости, нормированной на среднемассовую скорость (U/U_b) в радиальном направлении межтрубного пространства, описываемого безразмерным параметром (r_1/S), полученных по моделям: kw-SST [46]; kw [47–49]; ke [39]; ke – Realizable [2]; ke – RNG, RSM [2]

Fig. 6. Calculations [45] of distributions of the axial component of the velocity vector normalized by the average mass velocity (U/U_b) in the radial direction of the annular space described by a dimensionless parameter (r_1/S) obtained from the models: kw-SST [46]; kw [47–49]; ke [39]; ke – Realizable [2]; ke – RNG, RSM [2]

В [43] акцент сделан на использовании ЭЛ подхода и тестировании результатов по экспериментам, выполненным на оборудовании в Средневосточном Университете (Стамбул, Турция). Обнаружено, что модель успешно предсказывает перепад давления, изменения полей концентрации шлама при высоких скоростях жидкости. Однако результаты (соответствия теории и опыта) сильно расходятся при анализе режимов течений с низкими скоростями. Это связано с тем, что в [43] численно исследовался перенос шлама с неподвижного слоя к дисперсионному потоку с увеличением скорости жидкости. Анализ показывает, что данные расчетов нуждаются в совершенствовании модели транспорта смеси в рамках ЭЛ подхода, особенно при низких скоростях потока, при которых частицы сосредоточены в нижней части слоя из осаждаемых частиц в непосредственной окрестности стенки скважины, где их объёмная доля имеет значения больше 12 %. Эти сведения демонстрируют результаты, представленные на рис. 5, отвечающие значениям процесса: длина ствола и диаметр скважины соответственно – 0,6096; 0,073914 м; диаметр буровой трубы и ее эксцентриситет соответственно – 0,04699; 0,623 м; буровой шлам составляют частицы гравия (диаметр – 0,0020066 м). Включаются условия: механическая скорость проходки – $ROP=0,00508-0,00677$ м/с; расход воды по межтрубному пространству – 0,6096–2,7432 м³/с; давление и температура в скважине соответственно – 11 248,0–14060 кг/м², 25 °С. Расчеты выполнены на разностной сетке с числом конечных элементов 4107471. Данные расчетов показывают, что в таких условиях пространственные картины изменений полей скорости и состава при течении смеси с высокими скоростями (опыт) удовлетворительно предсказываются теорией.

Возможности расчета сложных течений в рамках отдельных моделей турбулентности RANS-метода представлены в [45]. Так, на рис. 6 приведены распределения осевой компоненты вектора скорости, нормированной на среднемассовую скорость, U/U_b , в радиальном направлении межтрубного пространства, описываемого безразмерным параметром, r_1/S . Здесь r_1 – радиальная координата, отсчитываемая в направлении от стенки внутренней трубы к внешней; S – поперечный размер межтрубного пространства. Предполагается, что транспортируемая жидкость представляет собой неньютоновскую степенную вязкую среду, стенка внутренней трубы неподвижна и без эксцентриситета. Из рис. 6 видно, что в лучшем согласии с опытом находятся результаты расчета по SST kw-модели [46]. Однако наш анализ сложных внутренних течений [2] указывает на преимущества моделей с уравнениями для псевдо завихренности (w), интегрального масштаба (L). Такие модели можно рекомендовать для прогноза очистки. Имеющиеся погрешности следует отнести на счет проблем моделирования распределений дисперсной фазы. Последняя рассчитывалась в рамках идей ЭЛ подхода, учета фактора столкновений частиц, описываемых моделью деформируемых сфер, аналогично [47]. Детальный анализ результатов исследования процессов гидроди-

намики и массообмена показывает, что целесообразен учет моделью эффектов взаимовлияния процессов переноса между частицами несущей и дисперсной фаз. Кроме того, сравнения данных теории и опыта, отвечающего результатам [48], обнаруживают максимальную погрешность (порядка 5 %). Заметим, что эксперименты проведены с одномерными частицами сферической формы, что приводит к заключению о необходимости совершенствования моделей динамики частиц смеси. Важным результатом этого исследования является оценка влияния на структуру течения вращений стенки внутренней трубы: вдоль своей собственной оси; вдоль оси внешней трубы (орбитальное вращение).

В [50] в рамках ЭЭ исследовалось течение пенного раствора с частицами дисперсной фазы. Учитывались эффекты от эксцентриситетности внутренней трубы ($e=0,78$). Заметим, что данное значение более реально в практических процессах, нежели в [42], где геометрия трубы отвечала условию $e=0,9$. В [51] экспериментально проанализированы процессы в смеси, включающие одномерные частицы сферической формы (с диаметром 3 мм и плотностью 2610 кг/м³). Результаты показывают, что реология пены лучше описывается моделью степенного закона, нежели связью Гершеля–Балкли в режимах ламинарного течения, осложненного эффектами вращения стенки внутренней трубы. В таких режимах погрешность данных моделирования параметров поля течения составляет 8–10 %. Различия объясняются неточностью моделирования коэффициентов молярного переноса импульса и массы в смесях. Высокая вязкость пен и подвижность стенки внутренней трубы интенсифицируют конвективно-диффузионные механизмы процессов переноса массы и импульса в смеси. Включение этих деталей в математическую модель позволяет повысить точность расчета параметров локальной динамической и реофизической структур потока, особенно в режимах закрученного течения. Результаты таких исследований показывают, что использование пен с 90%-м качеством (в практических режимах бурения с пеной, отвечающих закрутке трубы со скоростью 120 об/мин, течения со скоростями 2 фут/с) повышает очистку скважин от шламов до 80 %. Важным следует признать замечание авторов о закономерностях влияния изменений реофизических свойств на несущую способность пенных растворов. Так, в отличие от полимерных растворов, которые лучше соответствуют модели Гершеля–Балкли, пены целесообразно описывать моделями: Бингама [52]; степенным законом [53]; Гершеля–Балкли [54]. В этом отношении данные [51] расчетов по ЭЭ подходу течений пен различного качества показывают, что пены с качеством меньше 80 % лучше реализуются моделью Гершель–Балкли, тогда как модель степенного закона характерна для пен с качеством выше 80 %.

В [55, 56] численно проанализированы эффекты влияния переменности параметров: отношения диаметров труб, скорости потока, вращения стенки внутренней трубы и реологии жидкости, на интенсивность образования массы шламов, а также величины изме-

нения поля давления в горизонтальных скважинах с эксцентричным размещением внутренней трубы. Математическое моделирование транспорта шламов выполнено на базе ЭЭ подхода в межтрубном пространстве с эксцентриситетом $e=0,623$ и отношением диаметров труб 0,64/0,9. Такие значения соответствуют реальным условиям при бурении горизонтальных участков, а также ситуациям, когда внутренняя труба почти соприкасается с нижней поверхностью внешней трубы и лишь элементы соединителей определяют ее отклонение от опорной поверхности. В [55, 56] оценено влияние заданных реальных значений геометрической конфигурации элементов оборудования, составляющих блок определения краевых условий для численного интегрирования дифференциальных уравнений математической модели. Отдельные результаты приведены на рис. 7, *a–d*, где отображена конфигурация межтрубного пространства с эксцентричным ядром ($e=0,623$) при различных значениях отношения диаметров (0,64 (a); 0,7 (b); 0,8 (c); 0,9 (d)) с картиной разностных сеток и особенностей размещения контрольных объемов в пристеночных зонах коаксиального пространства. Такие сведения о сетках полезны для уяснения проблем формулировки краевых условий, деталей построения устойчивого численного алгоритма расчета сложного сдвигового низкорейнольдсового течения (например, [1, 2]) неньютоновской среды со степенным законом реологии, а также выбора оптимальной версии $k\epsilon$ -модели [57] в анализе турбулентности.

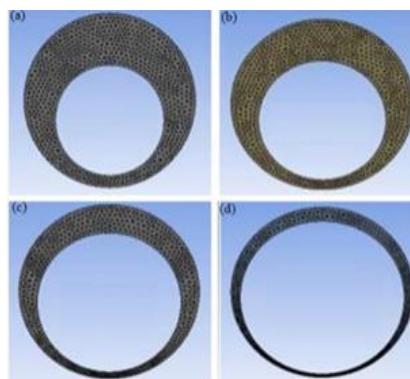


Рис. 7. Конфигурация межтрубного пространства с эксцентричным ядром ($e=0,623$) при отношении диаметров: 0,64 (a); 0,7 (b); 0,8 (c); 0,9 (d), по данным [55]

Fig. 7. Configuration of the annular space with an eccentric core ($e=0,623$) for different values of the diameter ratio: 0,64 (a); 0,7 (b); 0,8 (c); 0,9 (d), according to [55]

В [58] выполнено сравнение результатов моделирования (рабочее тело – вода) с данными опытов других авторов. Обнаружено, что соответствие теории и опытов по перепаду давления имеет погрешность меньше (2,18–4,4 %), а среднemasовых концентраций шламов меньше (6,4–11,82 %). Установлено, что вращение трубы интенсифицирует процесс транспорта шламов только при низких скоростях потока. Отдельные результаты численного моделирования, удо-

влетворительно описывающие реальный процесс транспорта шламов, приведены на рис. 8.

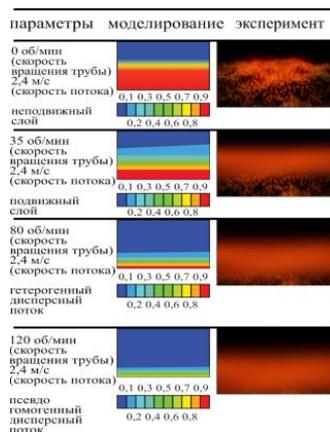


Рис. 8. Изменение режима потока слоя шламов при различных значениях вращения трубы. Шкала под результатами моделирования показывает объёмную долю шламов [58]

Fig. 8. Distribution of the cutting flow mode at different pipe rotation values. The scale under the simulation results shows the volume fraction of cuttings [58]

Таким образом, представленный анализ результатов численного и экспериментального исследований процессов очистки в режимах сложного течения указывает на большой спектр условий, формирующих погрешности расчетов локальных и интегральных параметров задачи [4–15, 17, 30–38, 40–45, 47, 48, 50–56, 58, 59]. И это неудивительно, т. к. в своем анализе многие авторы обращаются к феноменологическому методу.

Моделирование транспорта смесей в проблемных технологиях бурения

С этих позиций интересны сведения [60], где обращено внимание на перспективное направление, обусловленное бурением с колтубингом (с гибкими трубами), хотя главным препятствием на пути его широкого применения остаются несовершенство технологий и проблемы очистки скважин. Последние обостряются из-за невозможности обеспечить вращение трубы при образовании слоя шламов и заставляют искать решение в направлении выяснения условий для установления минимальной скорости потока, при которой обеспечивается вынос шламов из скважины или предотвращение их образования. С этой целью в [60] обращаются к ЭЭ подходу и низкорейнольдсовой k_w SST-модели турбулентности [46]. Расчеты выполнены для трех типов жидкостей: воды, жидкости со степенным законом и связью Гершеля–Балкли. Следует отметить, что в условиях традиционного бурения (без вращения трубы) турбулентностью можно пренебречь. Тогда как при колтубинге, вследствие узости кольцевого межтрубного пространства, турбулентность и ее механизмы при транспорте шламов имеют существенное значение и требуются обоснованные заключения о точности их расчета. Так, возможные переходы от ламинарного к турбулентному

режиму в потоке оценивались экспериментально (таблица), причем следует учесть, что для всех жидкостей представленное число Рейнольдса рассчитано по свойствам ньютоновской среды. Результаты показывают, что численное моделирование с удовлетворительной точностью способно прогнозировать режимы течений с минимальной скоростью, необходимой для очистки элементов оборудования от шламов.

Таблица. Распределения чисел Рейнольдса и его связи с характерной скоростью потока в режимах: перехода с ламинарного к переходному; от переходного к турбулентному, для трёх различных по реологии жидкостей [60]

Table. Distribution of Reynolds numbers and its relation to the characteristic flow velocity in transition from laminar to transient and from transient to turbulent for three fluids of different rheology [60]

| Жидкость Fluid | Режимы течений потока/Flow regimes | | | |
|------------------------------------|--|------------------------------------|--|------------------------------------|
| | от ламинарного к переходному from laminar to transition | | от переходного к турбулентному from transition to turbulent | |
| | число Рейнольдса Reynolds number | скорость (см/с) velocity (cm/s) | число Рейнольдса Reynolds number | скорость (см/с) velocity (cm/s) |
| Ньютоновская Newtonian | 2099 | 7 | 3000 | 9 |
| Степенная Power law | 2411 | 49 | 3311 | 62 |
| Гершеля–Балкли Herschel–Bulkley | 2589 | 86 | 3489 | 105 |

Анализ эффектов, сопровождающих течение в трехфазной смеси (жидкий раствор, твердые частицы и газ), осложненное тепломассопереносом, впервые выполнен в [61] для кольцевого пространства скважины. Подобная ситуация характерна для бурения скважин в режиме депрессии, который применяется при бурении обеднённых пластов. Численное моделирование внутри- и межфазных процессов переноса импульса, тепла и массы проведено в рамках ЭЭ подхода (для капельной и газообразной фаз), ЭЛ подходом – явлений в твердой фазе. Турбулентность оценивалась с помощью $k\epsilon$ -модели [39]. Допускается, что частицы имеют сферическую недеформируемую форму и предрасположены к столкновениям друг с другом. Решение задачи построено по алгоритму с первоначальным расчетом процессов в газожидкостной системе, позволяющей определить силы влияния со стороны капельной смеси на частицы (сопротивления, подъёмная сила, сила градиента давления). В [62] при исследовании процессов, включающих частицы в форме сферических керамических шаров одного диаметра и веса (3,66 мм, 2,4 г/см³), установлено, что погрешность (соответствие локальных и интегральных данных теории и опыта) при низких скоростях потока возникла из-за некорректности выбора коэффициентов сопротивления трения. Вместе с этим стоит допустить, что аналогично [43] при низких скоростях потока ЭЛ подход не вполне приемлем, так как погрешность определения концентрации частиц превышает 12 %.

Общий анализ результатов очистки позволяет отметить [47, 48, 50–56, 58–62], что процессы транспорта в реофизически сложных смесях во внутренних системах с эксцентричным ядром вполне успешно (погрешность до 4 % изменения интегральных параметров) описываются в рамках замыканий, используемых в программных пакетах по гидродинамике. Физически содержательные процессы в многофазном потоке исследованы в [63] на базе специального оборудования типа Позитронной Эмиссионной Томографии. Опираясь на эти результаты, в [64] выполнены исследования течений многофазной среды в рамках ЭЛ подхода, $k\varepsilon$ -модели турбулентности [49] со сферическими частицами и степенной жидкости. Обнаружено, что изменения локальных и интегральных параметров на различных этапах развивающегося течения смеси в сравнении с соответствующими опытами могут быть значительными (с погрешностью от 5 до 40 %).

В [65] на основе модели Сямлал – Обраян [66] предпринята попытка установить причину значительной погрешности численного моделирования нелинейных процессов в смеси, анализируя эффекты от переменности формы частиц. В качестве жидкой фазы использовались среды с реологией степенного закона и Гершеля–Балкли. Сравнение результатов моделирования течения смеси ньютоновской жидкости с частицами разных размеров с экспериментами [67] показало точность прогноза процесса перепада давления до 8,1 %, концентраций частиц – до 10,3 %. Все же это еще недостаточно для выдачи рекомендаций по корректному управлению процессами.

В [23] для уяснения деталей влияния формы частиц использовали ПК (STAR-CCM), ЭЛ подход и четыре формы частиц (рис. 9, данные [22]). В исследованиях предполагается, что для каждой частицы, состоящей из совокупности сфер, можно вычислить отдельные силы межфазного взаимодействия с замыканиями (7)–(32). Результаты расчета сравнивались с опытами [68]. Обнаружено, что форма частиц очень сильно влияет на результаты. Имеется ряд публикаций, в которых в качестве бурового раствора используются жидкости, включающие смесь воды и различных добавок, например [69, 70].

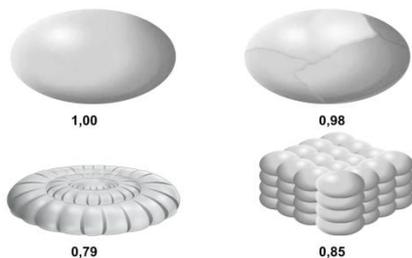


Рис. 9. Разнообразные геометрические формы частиц, используемых в численном моделировании и построенных из меньших сфер. Число под изображением – коэффициент сферичности (по данным [22, 23])

Fig. 9. Various geometric shapes of particles used in numerical modeling and constructed from smaller spheres. The number under the image is the sphericity coefficient (according to [22, 23])

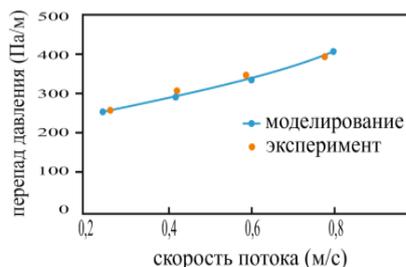


Рис. 10. Распределение перепада давления от скорости потока для условий, сопровождающих бурение и включающих неньютоновские среды в качестве бурового раствора. Здесь: линия с символом – расчет ламинарного течения однофазной жидкости типа Гершеля–Балкли в эксцентричном кольцевом пространстве; символы – эксперимент [71, 72])

Fig. 10. Distribution of the pressure drop vs flow rate for real drilling conditions using a non-Newtonian drilling fluid. Here: the calculation (line with symbol) corresponds to the laminar flow of a single-phase Herschel–Bulkley liquid in an eccentric ring space; symbols correspond to the experiment [71, 72])

Наряду с этим существуют растворы с типом нефти или газойля, не содержащие твёрдые частицы и используемые при бурении продуктивных слоёв. В [71] впервые выполнено исследование определения эффективности их функционирования при транспорте шлама. При моделировании использован ЭЭ подход, реологическая модель Гершеля–Балкли. Результаты распределений перепада давления, вызывающего транспортировку общей массы бурового раствора со свойствами подобной неньютоновской жидкости по межтрубному пространству скважины в зависимости от его среднemasсовой скорости, иллюстрируют данные рис. 10, где моделирование (линия) отвечает экспериментальным условиям течения (символы, данные [71, 72]). Высокая степень соответствия данных теории и опыта свидетельствует об адекватности модельного описания и прогноза процессов переноса импульса смеси, характера изменений поля скорости в кольцевой зоне.

Более полная картина процессов течения шлама в смеси с неньютоновской жидкостью типа Гершель–Балкли в скважине с эксцентричным ядром рассматривалась в [73, 74]. Моделирование гидродинамики турбулентного течения выполнено в рамках ЭЭ подхода, включающего обращение к моделям вихревой вязкости ($k\varepsilon$, $k\varepsilon_w$ [39, 46, 49]), полного тензора напряжения Рейнольдса [1, 2, 57] – для учета анизотропных эффектов. При описании движения частиц твердой фазы предполагалась их одноразмерность (0,25 дюймов с плотностью 2650 кг/м³) и сферическая форма. Эффекты межфазного взаимодействия описываются в рамках положений моделей Гидаспау [75], а также модели Сямлал [66]. Некоторые данные распределений концентраций частиц смеси в зависимости от среднemasсовой скорости течения смеси в межтрубном пространстве приведены на рис. 11, где имеются сравнения расчетов с данными экспериментов, выполненных в [76, 77]. Из рисунка видно, что модели-

рование диффузии вещества смеси вполне успешно ввиду полного учета нелинейных конвективно-диффузионных механизмов изменений полей скоростей фаз, их межфазных эффектов. Это позволяет судить о надежности ЭЭ подхода в прогнозах процессов в данной гидродинамической конфигурации.

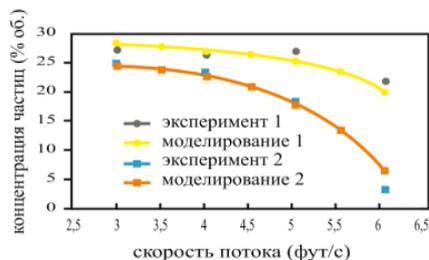


Рис. 11. Распределения концентраций частиц в зависимости от скорости потока: 1 – с качеством пены 80 %; 2 – с качеством пены 90 % при использовании частиц размером 3 мм и плотностью 2,61 кг/см³; длина труб 73 футов, диаметр 5,6 и 3,5 дюймов; без вращения внутренней трубы. Результаты расчета сравнили с результатами экспериментов [76], сведения по данным [73]

Fig. 11. Distributions of particle concentrations vs average flow velocity: 1 – with foam quality of 80 %; 2 – with foam quality of 90 % using particles of 3 mm in size and density of 2,61 kg/cm³; length of pipes is 73 feet and diameters are 5,6 and 3,5 inches; without rotation of the inner pipe. The calculation results were compared with the experimental ones [76], the data corresponds to [73]

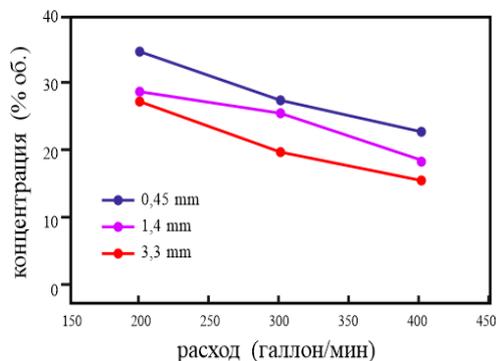


Рис. 12. Распределения объемной концентрации шлама в зависимости от изменений расхода, данные [74]

Fig. 12. Cuttings volumetric concentration vs. water flow rate for three different cuttings. Data from [74]

Отдельные авторские результаты численного исследования транспорта шлама (в условиях опыта [74]) при сложном сдвиговом течении, описываемом *kε*-моделью RANS-метода и ЭЭ подходом приведены на рис. 13–17, где проиллюстрирован характер изменения локальной структуры осредненного (рис. 13) и пульсационного течения смеси (рис. 14, 16, 17), частиц твердой фазы (рис. 15), а также ее отдельных интегральных параметров (рис. 12, данные [74]). В частности, расчеты в коаксиальной эксцентричной области скважины распределений объемной концентрации шлама в зависимости от изменений расхода

(рис. 12), осевой скорости (рис. 13), турбулентной вязкости (рис. 14), кинетической энергии турбулентности (рис. 16), степени турбулентности (рис. 17) для дистальной зоны ($x/D=150$) и концентрации частиц твердой фазы (рис. 15) в продольном сечении скважины $x/D=73,8$ в турбулентном режиме течения капельной ньютоновской смеси с частицами различных размеров представлены при следующих условиях. Анализировался транспорт в воде частиц песка размера и плотности соответственно, мм: 3,3; 1,4; 0,45, $\rho=1538$ кг/м³; при $Re=5,4 \cdot 10^4, 7,6 \cdot 10^4, 1 \cdot 10^5$; в межтрубном пространстве горизонтального участка: эксцентриситет – 0,8; внешний (D)/внутренний (d) диаметры соответственно, м – 0,2032/0,1143; длина скважины – 30,48 м. Результаты показывают, что замыкания математической модели и вычислительная технология построения решения задачи весьма успешны в прогнозе интегральных процессов. Об этом свидетельствуют сравнения с опытными данными [74] эволюции прямооточного течения смеси, изменений концентрации частиц. Так, аналогично данным рис. 12, расчетами обнаружена тенденция к снижению концентрации шлама в представленном диапазоне изменений расхода с отличием в 6–7 % между двумя близкими распределениями концентраций. Кроме того, установлено, что в данном режиме транспорт частиц в смеси сопровождается изменениями параметров пульсационной структуры, точность которых не удастся оценить из-за отсутствия соответствующего опытного материала [74]. Отметим, что последнее затрудняет непосредственное сравнение расчета объемной концентрации с опытом [74]. Данные моделирования указывают, что даже в условиях прямооточного течения ($RPM=0$) в межтрубном пространстве структура турбулентного течения отличается существенной неоднородностью в узких зонах поперечного сечения (рис. 13, 14, 16, 17), что соответствует [74]. Также установлено, что подавление частицами инерционных и диффузионных эффектов (рис. 15) обостряет механизмы обратного перехода в турбулентном течении и способствует ламинаризации [1–3, 18].

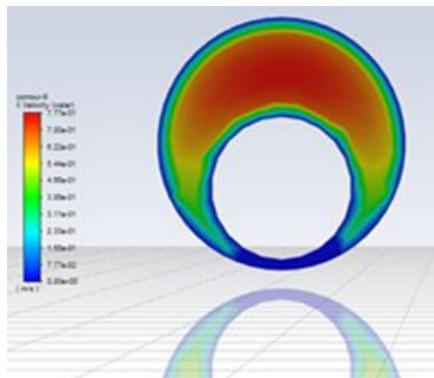


Рис. 13. Радиальное распределения осевой компоненты вектора скорости в выходном сечении ($x/D=150$) коаксиальной области при $Re=1,1 \cdot 10^5$

Fig. 13. Radial distribution of axial component of velocity vector in output section ($x/D=150$) of coaxial region at $Re=1,1 \cdot 10^5$

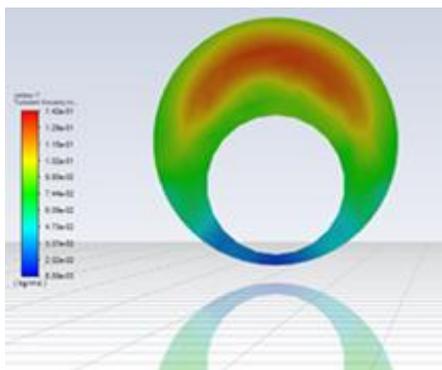


Рис. 14. Поле молярной вязкости в выходном сечении при $Re=7,6 \cdot 10^4$

Fig. 14. Molar viscosity in output section at $Re=7,6 \cdot 10^4$

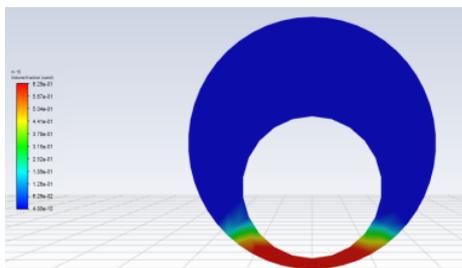


Рис. 15. Радиальное распределение концентрации частиц песка при $x/D=150$, $Re=5,4 \cdot 10^4$

Fig. 15. Radial distribution of sand particles concentration at $x/D=150$, $Re=5,4 \cdot 10^4$

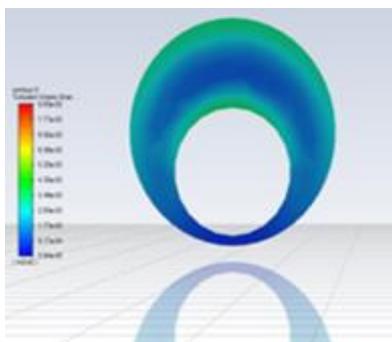


Рис. 16. Поле кинетической энергии турбулентности в выходном сечении при $Re=5,4 \cdot 10^4$

Fig. 16. Turbulence kinetic energy in output section at $Re=5,4 \cdot 10^4$

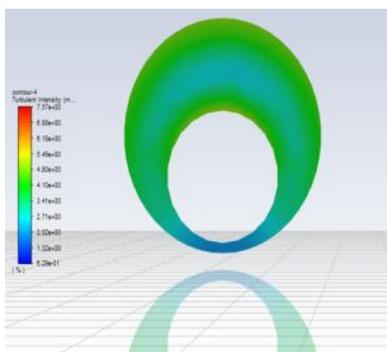


Рис. 17. Поле интенсивности турбулентности в выходном сечении при $Re=1,1 \cdot 10^5$

Fig. 17. Turbulent intensity in output section at $Re=1,1 \cdot 10^5$

В [78] использована близкая к [73] по физическому содержанию модель транспорта смеси капельной жидкости типа Гершеля–Балкли и одномерных сферических частиц в коаксиальной области с эксцентричным вращающимся ядром при ламинарных и турбулентных режимах течения дисперсных сред. Причем для расчета молярных свойств течения ньютоновской смеси привлекалась однофазная двухпараметрическая kw -SST модель [46], а для неньютоновских дисперсных систем – система феноменологических модельных замыканий вида (33)–(35). Так, для уравнения движения смеси имеем тензор вязких напряжений по [79, 80]:

$$\bar{T} = 2\mu \left[\bar{S} - \frac{1}{3}(\nabla \cdot \bar{v})\bar{I} \right],$$

$$\mu = \mu_f \exp \left\{ \frac{2,5}{\beta} \left[\frac{1}{(1-\alpha_s)^{1,5}} - 1 \right] \right\} + \mu_{fr}; \quad (33)$$

$$\mu_f = \frac{k_v \dot{\gamma}^n + \tau_0 (1 - e^{-m \frac{\dot{\gamma}}{\Gamma}})}{\dot{\gamma}}; \quad (34)$$

$$\dot{\gamma}^2 = 2S_{ij}^d S_{ij}^d + \frac{\rho \varepsilon}{\mu}. \quad (35)$$

Здесь ρ – плотность смеси; μ – вязкость смеси; ε – скорость диссипации кинетической энергии турбулентности; μ_f – вязкость жидкости; μ_{fr} – вязкость, обусловленная взаимодействием частиц; $\dot{\gamma}$ – скорость деформаций в смеси; β , n , m , Γ – постоянные реологической модели неньютоновской среды; k_v – параметр консистенции смеси; τ_0 – предел текучести.

Расчеты выполнялись при следующих параметрах течения смеси: критерий Рейнольдса, $Re = \frac{\rho_f U^{2-n} D_0^n}{\kappa} =$

$$= 740 \dots 8000; \text{ критерий Бингама, } Bi = \frac{\tau_0}{\kappa \left(\frac{U}{D_0} \right)^n} = 15 \dots 5,5;$$

$\rho_f=2400 \text{ кг/м}^3$, $\tau_0=7,34 \text{ Па}$, $n=0,6435$; $k_v=0,0747 \text{ Па} \cdot \text{с}^n$; внешний и внутренний диаметры соответственно, $D_o=0,254 \text{ м}$; $D_i=0,127 \text{ м}$; $U=0,957 \text{ м/с}$; диаметр частиц, $d_p=3 \text{ мм}$.

Численное моделирование определяющих уравнений законов сохранения выполнено в рамках ЭЭ метода на мелких разностных сетках, что позволило добиться точности расчета локальных параметров. Причем установлено [78], что вследствие роста параметров текучести среды (при изменении вязкости и скорости вращения буровой трубы) наблюдается уменьшение концентрации частиц шлама в поперечном сечении канала. Исследование показало, что при транспорте шлама наблюдаются два режима, формируемых: *первичной* циркуляцией (из-за вращения буровой колонны), а также *вторичной*, где доминируют вторичные вихревые структуры. Физические особенности *первого* режима определяются наличием не большой концентрации частиц в поперечном сечении

канала и сравнительно небольшим перепадом давления. Такие значения являются предпочтительными для бурения и могут быть достигнуты при небольших эксцентриситетах и высоких скоростях вращения. Второй режим поддерживается малыми скоростями вращения, малой вязкостью жидкости и высокими концентрациями частиц дисперсной фазы. Отмечено, что поток в эксцентричном кольцевом пространстве всегда генерирует вторичную циркуляцию, которая включает эффекты перехода вихревой природы и оказывает значительное влияние на падение давления, динамику и концентрацию частиц в локальных областях течения. Общий анализ результатов процессов течений смеси по [73, 78] указывает на корректность прогноза транспорта частиц в сложном закрученном течении смеси из-за вращения внутренней стенки трубы вдоль своей оси, а также влияния ее эксцентриситета и орбитального вращения буровой трубы в скважине.

Деталю исследования гидродинамики турбулентного гетерогенного потока, осложненного орбитальным вращением внутреннего ядра/трубы, посвящена работа Б. Панга и соавторами [81]. Моделирование турбулентного течения реофизической смеси с внутри- и межфазными процессами переноса импульса и массы выполнено в рамках идей ЭЭ подхода, модели межфазного взаимодействия Гидаспау со сферическими, одномерными частицами (подобно [73]), kw модели [49] и степенного реологического закона. Верификация результатов моделирования оценивалась по данным измерений локальных параметров течения, выполненных в [82]. Соответствие изменений расчетных интегральных параметров экспериментальному режиму (с параметрами: раствор 0,4 КМК и 0,5 % бентонит, расход жидкости 1 лит/мин, длина труб 1,8 м, диаметр труб 44 и 30 мм, диаметр частиц 0,1 мм и плотность 2,55 кг/см³) с погрешностью до 15 % говорит об удовлетворительном качественном описании эффектов переноса в смеси. Последнее можно объяснить тем, что моделирование выполнено в среде со свойствами модели Гершеля–Балкли. Общий анализ результатов [78, 81] также подтверждает факт влияния орбитального движения трубы на очистку скважины. Причем тем значительнее, чем интенсивнее её вращение, в частности, вдоль собственной оси.

С учетом сформулированных выше модельных допущений (ЭЭ подход, сферические частицы, неньютоновская степенная жидкость, kw -SST-модель турбулентности, реофизическая модель Гидаспау) в [83] проведен анализ процессов транспорта во внутренних системах (трубы с соединителями). Согласно этим данным видно, что в большинстве исследований рассматриваемых процессов авторы обращаются к моделям межфазного взаимодействия, представленным Гидаспау, либо Сямла-Обрайн. Результаты расчетов гидродинамики и массоперенос в трубах показывают, что центральное место в проблеме повышения точности прогноза параметров течения и транспорта частиц по межтрубному пространству скважины занимают механизмы, ответственные за обменные эф-

фекты, обусловленные орбитальным вращением поверхности стенки внутренней трубы. Заметим, что два ярких свойства орбитально вращающихся потоков выделяют такое движение в класс особых режимов течений жидкостей и газов: первое обусловлено созданием поля центробежных сил, подавляющих действие силы тяжести, и одновременно генерацией механизмов, интенсифицирующих вторичные течения; второе ответственно за изменение характера пристеночного течения и механизмов в периферийных коаксиальных зонах. Данные свойства целенаправленно используются при проектировании механизмов, препятствующих осаждению частиц в жидкости (буровом растворе). Экспериментальное исследование особенностей течения при орбитальном вращении вязкого потока на полномасштабных установках затруднено из-за необходимости внесения новых технологических и конструкторских решений по эффективному вращению внутренней трубы. В настоящее время такие эффекты составляют предмет теоретического анализа, а экспериментально моделируются только процессы с коаксиальной закруткой. Эти данные привлекаются для тестирования процессов очистки скважин.

Результаты опубликованных работ в последние годы (например, [84–89]) показывают существенный прогресс компьютерного моделирования процессов транспорта шлама при обычном бурении, а также адаптации популярных гидродинамических подходов и моделей к малоизученным проблемам. Например, Б. Панг и соавторы [84] изучили процесс очистки скважин при бурении, осложненном пульсационным режимом движения раствора. Б. Шаю и соавторы [85] моделировали подобный процесс при бурении метаноугольных пластов с применением двойной циркуляции, а А. Гайлани и соавторы [86] исследовали этот процесс с привлечением современных технологий в рамках смесей с наночастицами [86]. Все современные исследования нуждаются в выяснении вопроса достоверности используемых численных методик, особенно при выдаче рекомендаций в практику. В этом смысле, например, М. Эскудиер и соавторы [87] обращают внимание на необходимость детального моделирования турбулентной неоднородности и анизотропии во внутреннем потоке при транспорте реологически сложной среды. М. Хук и соавторы [88] проанализировали чувствительность очистки шлама к разным параметрам (особенно к размеру частиц). Ф. Жанг и соавторы [89] провели большую работу по апробации новых моделей вычислительной гидродинамики в прогнозе радиальных процессов в скважинах и получили более точные результаты изменений локальной структуры потока. Все последние результаты демонстрируют, что поиск более точных, эффективных и экономичных маршевых схем, методов моделирования и расчета процессов очистки скважин представляет интенсивно развивающуюся и весьма актуальную тему инженерных гидродинамических исследований.

Таким образом, детальный анализ указанных проблем по [1–3, 60–89] позволяет утверждать, что в

настоящее время имеется большой дефицит экспериментальных данных, необходимых для тестирования изменений локальной структуры потока, валидации разрабатываемых математических моделей и верификации их результатов. Вместе с этим очевиден прогресс исследований сложных течений смесей в межтрубном пространстве (в конфигурациях, характерных для скважин) в рамках ЭЭ и ЭЛ подходов, позволяющих вполне корректно прогнозировать нетривиальные эффекты при транспорте шлама в достаточно широких гидродинамических условиях, особенно при наложении крутки на прямоочное течение смеси.

Выводы

Анализ результатов численного моделирования процессов очистки горизонтальных скважин позволяет сделать следующие выводы:

1. Прогноз процессов в жидкой фазе считается вполне успешным для большинства локальных параметров задачи (полей компонентов вектора скорости, концентрации и т. д.) и интегральных величин (перепада давления, сопротивления и т. д.), характеризующих течения в смесях в широком диапазоне изменений их реофизических свойств, геометрических и гидродинамических конфигураций, изменений межтрубного пространства, размеров труб, их соединений, особенностей размещения бурового оборудования. Хорошее соответствие результатов моделирования транспорта шламов экспериментам дают результаты исследований [22, 23, 33, 71–73, 77, 80–83], отвечающих формированию транспорта частиц шлама в условиях вязко-инерционного течения. Большей частью это характерно для режимов транспорта при параметрах: использование ньютоновской и неньютоновской жидкостей Гершеля–Бакли, со степенным законом, пен и их смесей с массой полимера 2,0...3,5 г; при $Re=740...110000$, $Vi=3...20$, $e=0,0...0,9$; в геометриях с изменениями внешнего/внутреннего диаметра труб $\sim(12,25...8,5)/(5,5...5,0)$; длины скважины – до 30–40 м; сферичности частиц 0,8–1,0).
2. Проблема моделирования турбулентности все еще ждет своего решения и остается важной, особенно для течений смесей со сложной реофизической структурой, испытывающей влияние массовых сил, обусловленных закруткой стенки (при параметрах от 0 до 60 об/мин). Анализ показывает, что возмущения от пульсационных процессов, нестабильность процессов переноса в дисперсных системах при сложных сдвиговых течениях ($Re=(0,3-10) 10^4$) вносит погрешности (от 4–5 %) в определение параметров локальной структуры при сравнении с имеющимися опытными данными. Это недопустимо при прогнозах реальных явлений и выдаче рекомендаций в практику приложенных задач очистки. В частности, данные [1–3, 22, 33, 45, 61, 77, 80] указывают, что модели типа вихревой вязкости весьма ограничены из-за невозможности реагировать на детали формирования течения с неоднородной турбулентностью при выраженном характере влияния центробежных и

инерционных сил, определяемых вращением. Однако в условиях прямоочного и слабозакрученного течения гомогенной и гетерогенной смеси (малые значения критерия Россби: $Ro < 0,5$ – турбулентные режимы; $Ro < 2$ – ламинарный поток) прогнозы процессов по изменению перепада давления, концентраций смеси с использованием $k\varepsilon$ -, $k\omega$ SST-моделей вполне пригодны. Для более широких условий течений в скважинах имеются лишь отдельные сведения прогноза их анизотропной структуры (например, [22, 33, 71, 73, 77, 80, 83]) и требуется разработка новых подходов и моделей [84–89].

3. Наибольшие проблемы расчета транспорта шламов связаны с моделированием процессов в дисперсной фазе. Установлено, что вполне оптимален с точки зрения затрат на реализацию и точность расчета эффектов течений эйлеров подход. При нем получены более точные результаты формирования полей динамического и диффузионного состава смеси, особенно при учете геометрических деталей о частицах (в рамках положений теории гранулярного течения) и эффектов межфазного взаимодействия.
4. Лагранжев подход, как более детальный, нуждается в гораздо больших вычислительных ресурсах, весьма чувствителен к заданию конфигурации и размеров частиц, их взаимодействий. В таком подходе на точность моделирования сильно влияет любая неопределенность данных, необходимых для формулировки краевых условий задачи (например, сведения о форме частиц). В рамках подхода обнаружены тонкие рециркуляционные эффекты, обусловленные вторичными течениями, для прогноза которых требуются соответствующие модели турбулентности более высокого порядка.
5. Преобладающими в процессах очистки скважин выступают эффекты, формируемые вращением внутренней трубы (вокруг своей оси – подвижная стенка; вокруг оси буровой колонны – орбитальное движение). Общий анализ результатов таких режимов показывает, что орбитальное движение внутренней трубы имеет определяющее значение в процессах очистки скважин в сравнении с потоком, испытывающим влияние от вращения внутренней трубы вдоль своей собственной оси. Изучение механизмов (например, согласно [77]), определяющих течение в данных условиях, способно уяснить физику процессов транспорта шламов, происходящих в забоях скважин.
6. Включение в модель технологических особенностей бурового оборудования (например, геометрии соединительных узлов между трубами) способно повысить точность прогноза процессов транспорта шлама из горизонтальных участков. Анализ показывает, что перспективу дальнейших исследований составляют задачи:
 1. Разработки основ теории, объясняющих суть эффектов в процессах транспорта шламов из горизонтальных скважин с помощью идей эйлерова и лагранжева подходов, новых моделей турбулент-

- ности с дифференциальными уравнениями для корреляций пульсаций вектора скорости и скаляра. Это предмет гидродинамических задач по обобщению известных моделей для напряжений Рейнольдса на класс закрученных (по орбитальному типу) гетерогенных внутренних течений с современными двухпараметрическими базами.
2. Проведения исследований по установлению преимуществ отобранных моделей турбулентности для описания транспорта шламов при сложном сдвиговом потоке с учетом изменений значений параметров гранулярного состава и течения

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Prospects of RANS models with multiparameter effects at simulation of complex non-isothermal flows of viscous media in devices with any configuration of surface / S.N. Kharlamov, V.Yu. Kim, S.I. Silvestrov, R.A. Alginov, S.A. Pavlov // The 6th Proceedings of the International Forum on Strategic Technology (IFOST-2010). – Harbin, China, August 22–24, 2011. – V. 2. – P. 787–791.
2. Харламов С.Н., Фатьянов Д.М. Исследование структуры турбулентного потока природного сырья в трубопроводах с секцией переменного по длине поперечного сечения конфузурно-диффузорного типа // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 8. – С. 53–67.
3. Харламов С.Н., Джангхорбани М. Процессы транспорта шлама при очистке скважин с произвольной ориентацией буровых труб, содержащих эксцентрично расположенное круглое ядро с подвижной стенкой: проблемы, результаты, перспективы (обзор) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 7. – С. 131–149.
4. Pigott R.J.S. Mud flow in drilling // Drilling and production practice. – New York, USA, American Petroleum Institute, 1942. – P. 91–103.
5. Zeidler H.U. Fluid and drilled particle dynamics related to drilling mud carrying capacity. PhD thesis. – Oklahoma, USA, 1974. – 304 p.
6. Thomas R.P., Azar J.J., Becker T.E. Drillpipe eccentricity effect on drilled cuttings behavior in vertical wellbores // Journal of Petroleum Technology. – 1982. – V. 34. – № 9. – P. 920–929.
7. Hussaini S.M., Azar J.J. Experimental study of drilled cuttings transport using common drilling muds // Society of Petroleum Engineers Journal. – 1983. – V. 23. – № 1. – P. 11–20.
8. Qureshi M.A. Experimental study on effective hole cleaning using mechanical cleaning devices. MS Thesis. – Oklahoma, USA, 2004. – 180 p.
9. Okrajni S., Azar J.J. The effects of mud rheology on annular hole cleaning in directional wells // SPE Drilling Engineering. – 1986. – V. 1. – № 4. – P. 297–308.
10. Review and analysis of cuttings transport in complex structural wells / W. Kelin, Y. Tie, S. Xiaofeng, S. Shuai, L. Shizhu // The Open Fuels & Energy Science Journal. – 2013. – V. 6. – № 1. – P. 9–17.
11. Lummus James L., Azar J.J. Drilling fluids optimization: a practical field approach. – Tulsa, PennWell, USA, 1986. – 196 p.
12. Kelessidis V.C., Hatzistamou V. Preparation methodology and rheological properties of yield pseudoplastic transparent fluids // Journal of Dispersion science and Technology. – 2011. – V. 32. – № 3. – P. 380–388.
13. Nazari T., Hareland G., Azar J.J. Review of cuttings transport in directional well drilling: systematic approach // SPE Western Regional Meeting. – Anaheim, California, USA: Society of Petroleum Engineers, 2010. – P. 1–15.
14. Wadell Hakon. Volume, shape and roundness of quartz particles // The Journal of Geology. – 1935. – V. 43. – № 3. – P. 250–280.
15. Drill cutting transport in full scale vertical annuli / T.R. Sifferman, G.M. Myers, E.L. Haden, H.A. Wahl // Fall Meeting of the Society of Petroleum Engineers of AIME. – Las Vegas, Nevada, USA: Society of Petroleum Engineers, 1973. – 12 p.
- (например, угла между частицами, моделей гранулярной вязкости и т. д.) при эйлеровом и лагранжевом подходах.
3. Детального моделирования процессов гидродинамики и тепломассопереноса в межтрубном пространстве при течении смеси с заданной формой частиц, оценок преимуществ лагранжева подхода, верификации результатов по опытным данным, полученным на основе современной техники (позитронной эмиссионной томографии, бесконтактной регистрации).
16. Kharlamov S.N. Heat and mass transfer in facilities with a moving piston // Heat Transfer Research. – 2007. – V. 38. – № 3. – P. 233–243.
17. Shook C.A., Roco M.C. Slurry flow: principles and practice. – London, UK: Butterworth-Heinemann, 1991. – 324 p.
18. Kharlamov S.N., Kim V.Yu., Silvestrov S.I. Numerical modelling of a vortical investigation of heat transfer in fields of centrifugal mass forces in elements of the power equipment with a curvilinear wall // The 5th Proceedings of the International Forum on Strategic Technology (IFOST-2010). – Ulsan, Korea, October 13–15, 2010. – P. 105–109.
19. Nigmatulin R.I., Khabeev N.S., Nagiev F.B. Dynamics, heat and mass transfer of vapour-gas bubbles in a liquid // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 1981. – V. 24. – № 6. – P. 1033–1041.
20. Sommerfeld M. Theoretical and experimental modeling of particulate flows: overview and fundamentals. P. I–II. Lectures Series 2000-6. – Karlsruhe, Germany: Von Karman Institute for Fluid Dynamics, 2000. – 60 p.
21. Crowe C.T., Sommerfeld M., Tsuji Y. Fundamentals of gas-particle and gas-droplet flows. – Boca Raton, USA: CRC Press, 1998. – 179 p.
22. A study on the validity of the multi-sphere discrete element method / H. Kruggel-Emdem, S. Rikelt, S. Wirtz, V. Scherer // Powder Technology. – 2008. – V. 188. – № 2. – P. 153–165.
23. Akhshik S., Behzad M., Rajabi M. CFD-DEM simulation of the hole cleaning process in a deviated well drilling: the effects of particle shape // Particuology. – 2016. – V. 25. – P. 72–82.
24. Lain S., Sommerfeld M. Euler/Lagrange computations of pneumatic conveying in a horizontal channel with different wall roughness // Powder Technology. – 2008. – V. 184. – P. 76–88.
25. Mei K. An approximate expression for the shear lift force on a spherical particle at finite Reynolds number // International Journal of Multiphase Flow. – 1992. – V. 18. – № 1. – P. 145–147.
26. Kuang S.B., Yu A.B., Zou Z.S. Computational study of flow regimes in vertical pneumatic conveying // Industrial and Engineering Chemistry Research. – 2009. – V. 48. – № 14. – P. 6846–6858.
27. Di Renzo A., Di Maio F.P. Comparison of contact-force models for the simulation of collisions in DEM-based granular flow codes // Chemical Engineering Science. – 2004. – V. 59. – № 3. – P. 525–541.
28. Chien S.F. Settling velocity of irregularly shaped particles // SPE Drilling and Completion. – 1994. – V. 9. – № 4. – P. 281–289.
29. Flow instabilities of Herschel-Bulkey fluids / A.N. Alexandrou, P. Le Menn, G. Georgiou, V. Entov // Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics. – 2003. – V. 116. – № 1. – P. 19–32.
30. Saffman P.G. The lift on a small sphere in a slow shear flow // Journal of Fluid Mechanics. – 1965. – V. 22. – № 2. – P. 385–400.
31. Oesterle B., Bui D.T. Experiments on the lift of a spinning sphere in a range of intermediate Reynolds numbers // Experiments in fluids. – 1998. – V. 25. – № 1. – P. 16–22.
32. Computational Fluid Dynamics (CFD) as a tool to study cutting transport in wellbores / H.I. Bilgesu, M.W. Ali, K. Aminian, S. Ameri // The Eastern Regional Meeting of the Society of Petroleum Engineers. – Lexington, Kentucky, USA, October 2002. – 27 p.
33. Mishra Nekkhal. Investigation of hole cleaning parameters using computational fluid dynamics in horizontal and deviated wells. Graduate Theses. – USA, 2007. – 76 p.

34. CFD simulation of single-phase two-phase flow in gas-liquid cylindrical cyclone separators. Paper SPE 36645 / F.M. Erdal, S.A. Shirazi, O. Shoham, G.E. Kouba // SPE Annual Technical Conference and Exhibition. – Denver, CO, October 6–9, 1996. – P. 1–15.
35. Solid-liquid hydrodynamics in a slim hole drilling annulus / S.M. Han, Y.K. Hwang, N.S. Woo, Y.J. Kim // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2010. – V. 70. – № 3–4. – P. 308–319.
36. Saggot A.M., Dupuis D.C. A major step in ultra slimhole drilling // SPE Annual Technical Conference. – New Orleans, September 1994. – 10 p.
37. Simulation of the cuttings cleaning during the drilling operation / H.H. Al-Kayiem, M.Z.A. Ismail, N.M. Zaki, M.E. Elfeel // American Journal of Applied Sciences. – 2010. – V. 7. – № 6. – P. 800–806.
38. Pereira F.A.R., Ataíde C.H., Barrozo M.A.S. CFD Approach using a discrete phase model for annular flow analysis // Latin American applied research. – 2010. – V. 40. – № 1. – P. 53–60.
39. Launder B.E., Spalding D.B. The numerical computation of turbulent flows // Numerical prediction of flow, heat transfer, turbulence and combustion. – London: Pergamon, 1983. – P. 96–116.
40. Mme U., Skalle P. CFD calculations of cuttings transport through drilling annuli at various angles // International Journal of Petroleum Science and Technology. – 2012. – V. 6. – № 2. – P. 129–141.
41. Computational modeling of drilling fluids dynamics in casing drilling / M. Mokhtari, M.A. Ermila, A.N. Tutuncu, M. Karimi // SPE Eastern Regional Meeting. – Lexington, Kentucky, USA, October 2012. – P. 1–13.
42. Zhu X.H., Sun C., Tong H. Distribution features, transport mechanism and destruction of cuttings bed in horizontal well // Journal of Hydrodynamics. – 2013. – V. 25. – № 4. – P. 628–638.
43. Osgouei R.E., Ozbayoglu M.E., Fu T.K. CFD simulation of solids carrying capacity of a newtonian fluid through horizontal eccentric annulus // ASME 2013 Fluids Engineering Division Summer Meeting. – Incline Village, Nevada, USA, July 2013. – P. 1–9.
44. Gas-liquid flow through horizontal eccentric annuli: CFD and experiments compared / M. Sorgun, R.E. Osgouei, M.E. Ozbayoglu, A.M. Ozbayoglu // ASME-JSME-KSME 2011 Joint Fluids Engineering Conference. – Hamamatsu, Shizuoka, Japan, January, 2011. – P. 3847–3852.
45. Demiralp Y. Effects of drill-pipe whirling motion on cuttings transport performance for horizontal drilling. Master dissertation. – USA, 2014. – 151 p.
46. Menter F.R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications // AIAA journal. – 1994. – V. 32. – № 8. – P. 1598–1605.
47. Cundall P.A., Strack O.D. A discrete numerical model for granular assemblies // Geotechnique. – 1979. – V. 29. – № 1. – P. 47–65.
48. Determination of cuttings lag in horizontal and deviated wells / A.J. Garcia-Hernandez, S.Z. Miska, M. Yu, N.E. Takach, C.M. Zettner // SPE Annual Technical Conference and Exhibition. – Anaheim, California, USA, November, 2017. – 11 p.
49. Wilcox D.C. Turbulence modeling for CFD. – La Canada, California, USA, 1998. – V. 2. – 461 p.
50. Simulation of cuttings transport with foam in deviated wellbores using computational fluid dynamics / R. Rooki, F.D. Ardejani, A. Moradzadeh, M. Norouzi // Journal of Petroleum Exploration and Production Technology. – 2014. – V. 4. – № 3. – P. 263–273.
51. CFD simulation of rheological model effect on cuttings transport / R. Rooki, F.D. Ardejani, A. Moradzadeh, M. Norouzi // Journal of Dispersion Science and Technology. – 2015. – V. 36. – № 3. – P. 402–410.
52. Beyer A.H., Millhone R.S., Foote R.W. Flow behavior of foam as a well circulating fluid // Proceedings of the Society of Petroleum Engineers of AIME. – San Antonio, Texas, USA, 1972. – P. 1–12.
53. Cuttings transport with foam in horizontal & highly-inclined wellbores / E.M. Ozbayoglu, S.Z. Miska, T. Reed, N. Takach // SPE/IADC Drilling Conference. – Amsterdam, the Netherlands, January 2003. – P. 1–9.
54. Bonilla L.F., Shah S.N. Experimental investigation on the rheology of foams // Proceedings of the SPE/CERI Gas Technology Symposium. – Calgary, Canada, April 2000. – P. 1–14.
55. Ofei T.N., Pao W. Modelling of pressure drop and cuttings concentration in eccentric narrow horizontal wellbore with rotating drillpipe // Journal of Applied Sciences. – 2014. – V. 14. – № 23. – P. 3263–3269.
56. Ofei T.N., Irawan S., Pao W. CFD method for predicting annular pressure losses and cuttings concentration in eccentric horizontal wells // Journal of Petroleum Engineering. – 2014. – V. 115. – P. 1–16.
57. Launder B.E., Dudley B.S. Mathematical models of turbulence // Journal of Fluid Mechanics. – 1973. – V. 57. – Iss. 4. – № 6. – P. 826–828.
58. Ofei T.N., Alhemyari S.A. Computational fluid dynamics simulation of the effect of drill pipe rotation on cuttings transport in horizontal wellbores using a Newtonian fluid // International Field Exploration and Development Conference. – Xian, China, September 2015. – P. 8–16.
59. Ofei T.N. Effect of yield power law fluid rheological properties on cuttings transport in eccentric horizontal narrow annulus // Journal of Fluids. – 2016. – V. 139. – P. 11–22.
60. Kamyab M., Rasouli V. Experimental and numerical simulation of cuttings transportation in coiled tubing drilling // Journal of Natural Gas Science and Engineering. – 2016. – V. 29. – P. 284–302.
61. Akhshik S., Rajabi M. CFD-DEM modeling of cuttings transport in underbalanced drilling considering aerated mud effects and downhole conditions // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2018. – V. 160. – P. 229–246.
62. Cuttings transport in directional and horizontal wells while aerated mud drilling / S. Naganawa, A. Oikawa, Y. Masuda, Y. Tetsuo, M. Hoshino, P. Acuna // IADC/SPE Asia Pacific Drilling Technology. – Jakarta, Indonesia, September, 2002. – P. 11–20.
63. Barigou M. Particle tracking in opaque mixing systems: an overview of the capabilities of PET and PEPT // Chemical Engineering Research and Design. – 2004. – V. 82. – № 9. – P. 1258–1267.
64. Epelle E.I., Gerogiorgis D.I. Transient and steady state analysis of drill cuttings transport phenomena under turbulent conditions // Chemical Engineering Research and Design. – 2018. – V. 131. – P. 520–544.
65. Epelle E.I., Gerogiorgis D.I. CFD modelling and simulation of drill cuttings transport efficiency in annular bends: effect of particle sphericity // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2018. – V. 170. – P. 992–1004.
66. Syamlal Madhava, O'Brien Th.J. Computer simulation of bubbles in a fluidized bed // American Institute of Chemical Engineers. – 1989. – V. 85. – № 1. – P. 22–31.
67. Sorgun M. Modeling of Newtonian fluids and cuttings transport analysis in high inclination wellbores with pipe rotation. MSc Thesis. – Ankara, Turkey, 2010. – 177 p.
68. Tomren P.H., Iyoho A.W., Azar J.J. Experimental study of cuttings transport in directional wells // SPE Drilling Engineering. – 1986. – V. 1. – № 1. – P. 43–56.
69. Hajipour Mastaneh. CFD simulation of turbulent flow of drill cuttings and parametric studies in a horizontal annulus // Scientific Notes. Applied Sciences. – 2020. – V. 2. – P. 1–12.
70. A study on non-spherical cuttings transport in CBM well drilling by coupled CFD-DEM / Shao Bing, Yifei Yan, Xiangzhen Yan, Zhiqian Xu // Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics. – 2019. – V. 13. – № 1. – P. 579–590.
71. CFD modeling of hydraulic behavior of oil-and water-based drilling fluids in laminar flow / S. Sayindla, B. Lund, J.D. Ytrehus, A. Saasen // SPE Drilling & Completion. – 2019. – V. 34. – Iss. 3. – P. 171–180.
72. Kelessidis V.C., Dalamarinis P., Maglione R. Experimental study and predictions of pressure losses of fluids modeled as Herschel-Bulkley in concentric and eccentric annuli in laminar, transitional and turbulent flows // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2011. – V. 77. – № 3–4. – P. 305–312.
73. Heydari O., Sahraei E., Skalle P. Investigating the impact of drillpipe's rotation and eccentricity on cuttings transport phenomenon in various horizontal annuluses using computational fluid dynamics (CFD) // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2017. – V. 156. – P. 801–813.
74. Transport of small cuttings in Extended Reach Drilling / M. Duan, S. Miska, M. Yu, N.E. Takach, R.M. Ahmed, J.H. Hallman // SPE Oil and Gas Conference and Exhibition. – Beijing, China, December 2006. – P. 1–9.
75. Gidaspow D. Multiphase flow and fluidization: continuum and kinetic theory descriptions. – London, UK: Academic press, 1994. – 461 p.

76. Chen Zhu. Experimental study on cuttings transport with foam under simulated horizontal downhole conditions // SPE Drilling & Completion. – 2007. – V. 22. – № 4. – P. 304–312.
77. Experimental study and modeling of cuttings transport using foam with drillpipe rotation / M. Duan, S. Miska, M. Yu, N.E. Takach, R.M. Ahmed, J.H. Hallman // SPE Drilling & completion. – 2010. – V. 25. – № 3. – P. 352–362.
78. Steady-state cuttings transport simulation in horizontal borehole annulus / Y. Ignatenko, O. Bocharov, A. Gavrilov, R. May // ASME 2018 37th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. – Madrid, Spain, June 2018. – P. 26–38.
79. Miller R.M., Morris, J.F. Normal stress driven migration and axial development in pressure-driven flow of concentrated suspensions // Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics. – 2006. – V. 135. – P. 149–165.
80. Johnson P.C., Jackson R. Frictional collisional constitutive relations for granular materials with application of plane shearing // Journal of Fluid Mechanics. – 1987. – V. 176. – № 3. – P. 67–93.
81. Effect of orbital motion of drill pipe on the transport of non-Newtonian fluid-cuttings mixture in horizontal drilling annulus / B. Pang, S. Wang, X. Jiang, H. Lu // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2019. – V. 174. – P. 201–215.
82. Miska S., Reed T., Kuru E. Advanced cuttings transport study: final technical report (date of issue: September 30 2004, DOE Award number: DE-FG26-99 BC15178. The University of Tulsa, 600 South College Avenue, Tulsa, Oklahoma 74104). – Tulsa, Oklahoma, 2004. – 284 p.
83. Busch A., Johansen S.T. Cuttings transport: on the effect of drill pipe rotation and lateral motion on the cuttings bed // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2020. – V. 191. – P. 107–136.
84. Investigation of cuttings transport in directional and horizontal drilling wellbores injected with pulsed drilling fluid using CFD approach / B. Pang, S. Wang, C. Lu, W. Cai, X. Jiang, H. Lu // Tunnelling and Underground Space Technology. – 2019. – V. 90. – P. 183–193.
85. Numerical investigation of a double-circulation system for cuttings transport in CBM well drilling using a CFD-DEM coupled model / B. Shao, Y. Yan, X. Wang, F. Liao, X. Yan // Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics. – 2020. – V. 14. – № 1. – P. 38–52.
86. Al-Gailani A., Al-Yasiri M., Wen D. Numerical study of cuttings transport of nanoparticle-based drilling fluid // Engineering Reports. – 2020. – № (e). – P. 12154–12168.
87. Escudier M.P., Nickson A.K., Poole R.J. Turbulent flow of viscoelastic shear-thinning liquids through a rectangular duct: quantification of turbulence anisotropy // Journal of non-newtonian fluid mechanics. – 2009. – V. 160. – P. 2–10.
88. Systematic sensitivity analysis of cuttings transport in drilling operation using computational fluid dynamics approach / M.M. Huque, S. Butt, S. Zendejboudi, S. Imtiaz // Journal of Natural Gas Science and Engineering. – 2020. – V. 81. – № 103386. – P. 17–38.
89. Modeling of dynamic cuttings transportation during drilling of oil and gas wells by combining 2D CFD and 1D discretization approach / F. Zhang, Y. Wang, Y. Wang, S. Miska, M. Yu // SPE Journal. – 2020. – V. 25. – Iss. 3. – № 6. – P. 21–42.

Поступила 19.04.2021 г.

Информация об авторах

Харламов С.Н., доктор физико-математических наук, профессор, профессор отделения нефтегазового дела Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Джангхорбани М., аспирант отделения нефтегазового дела Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

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

UDC 532.517:536.242:544.012:622.244:519.6

MATHEMATICAL MODELING AND RESEARCH METHODS OF HORIZONTAL WELLS HYDRODYNAMIC CLEANING

Sergey N. Kharlamov¹,
kharsn@mail.ru

Janghorbani Mehran¹,
mehran.janghorbani@gmail.com

Konstantin A. Filippov¹,
kost.filippov1@yandex.ru

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

Relevance of the research is determined by the need to understand modern achievements in modeling the processes of sludge transport in real conditions of drilling operations that increase drilling speed and the efficiency of well cleaning; to establish the advantages/disadvantages of existing approaches, modern models and complex methods for describing the dynamics of systems with particles in order to effectively choose the rheological properties of drilling fluids and eliminate the reasons of equipment loss.

The aim of this work is to understand the modern experience of modeling the processes of cleaning wells with complex geometries, mainly lying in the horizontal plane; to study the features of the flow of mixtures in the annular space with a circular core; providing recommendations for the practice of modeling and calculating hydrodynamic processes that increase hole cleaning efficiency.

Methodology. Theoretical and practical research methods from related fields of hydrodynamics and heat and mass transfer in rheologically and physically complex systems; methods for numerical modeling of laminar and turbulent flows under conditions of direct-flow and swirling flows created by a co-axially or orbitally rotating wall, which affect the formation of a layer of cuttings and the dynamics of particles of a dispersed mixture.

Results. The paper introduces the results of modern numerical studies of cleaning wells with horizontal sections and the information on aspects of detailed hydrodynamic and diffusion modeling of complex flows in inclined wells. The applied models and methods used to study the characteristics of flow and heat and mass transfer in homogeneous and heterogeneous media in internal systems are formulated. Aspects of modeling the processes of cuttings transport in the framework of Euler/Lagrangian approaches are discussed, taking into account the features introduced by the effects of interfacial interaction/rotation. The paper introduces the changes in cuttings concentration based on rheological properties (power-law or Herschel–Bulkley), different shapes/sizes of particles, flow regimes and inertial forces. The problems of improving the accuracy of cuttings transport modeling, the possibilities of new technologies, original turbulence models and their two-parameter dynamic bases used for increasing the intensification and efficiency of cleaning processes are analyzed. The authors have given the recommendations for their solution in the considered hydrodynamic and geometric configurations. The results and problems that are of fundamental and applied significance and constitute an independent subject of prospective research are indicated.

Key words:

Cuttings, well, cleaning, modeling, hydrodynamics, mass transfer, rheology, turbulence, structure, forces.

REFERENCES

1. Kharlamov S.N., Kim V.Yu., Silvestrov S.I., Alginov R.A., Pavlov S.A. Prospects of RANS models with multiparameter effects at simulation of complex non-isothermal flows of viscous media in devices with any configuration of surface. *The 6th Proceedings of the International Forum on Strategic Technology (IFOST-2010)*. Harbin, China, August 22–24, 2011. Vol. 2, pp. 787–791.
2. Kharlamov S.N., Fatyanov D.S. Investigation of natural raw materials turbulent flow structure in pipelines at confuser-diffuser section. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 8, pp. 53–67. In Rus.
3. Kharlamov S.N., Janghorbani M. Cuttings transport in hole cleaning considering well orientation, pipe eccentricity and pipe rotation: Problems, results, prospects (survey). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 7, pp. 131–149. In Rus.
4. Pigott R.J.S. Mud flow in drilling. *Drilling and production practice*. New York, USA, American Petroleum Institute, 1942. pp. 91–103.
5. Zeidler H.U. *Fluid and drilled particle dynamics related to drilling mud carrying capacity*. PhD thesis. Oklahoma, USA, 1974. 304 p.
6. Thomas R.P., Azar J.J., Becker T.E. Drillpipe eccentricity effect on drilled cuttings behavior in vertical wellbores. *Journal of Petroleum Technology*, 1982, vol. 34, no. 9, pp. 920–929.
7. Hussaini S.M., Azar J.J. Experimental study of drilled cuttings transport using common drilling muds. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 1983, vol. 23, no. 1, pp. 11–20.
8. Qureshi M.A. *Experimental study on effective hole cleaning using mechanical cleaning devices*. MS Thesis. Oklahoma, USA. 2004. 180 p.
9. Okrajni S., Azar J.J. The effects of mud rheology on annular hole cleaning in directional wells. *SPE Drilling Engineering*, 1986, vol. 1, no. 4, pp. 297–308.
10. Kelin W., Tie Y., Xiaofeng S., Shuai S., Shizhu L. Review and analysis of cuttings transport in complex structural wells. *The Open Fuels & Energy Science Journal*, 2013, vol. 6, no. 1, pp. 9–17.
11. Lummus James L., Azar J.J. *Drilling fluids optimization: a practical field approach*. Tulsa, PennWell, USA, 1986. 196 p.
12. Kelessidis V.C., Hatzistamou V. Preparation methodology and rheological properties of yield pseudoplastic transparent fluids. *Journal of Dispersion science and Technology*, 2011, vol. 32, no. 3, pp. 380–388.
13. Nazari T., Hareland G., Azar J.J. Review of cuttings transport in directional well drilling: systematic approach. *SPE Western Regional Meeting. Society of Petroleum Engineers*. Anaheim, California, USA, May, 2010. pp. 1–15.
14. Wadell Hakon. Volume, shape and roundness of quartz particles. *The Journal of Geology*, 1935, vol. 43, no. 3, pp. 250–280.
15. Sifferman T.R., Myers G.M., Haden E.L., Wahl H.A. *Drill cutting transport in full scale vertical annuli*. Fall Meeting of the Society of Petroleum Engineers of AIME. Las Vegas, Nevada, USA, Society of Petroleum Engineers, Oct. 1973. 12 p.
16. Kharlamov S.N. Heat and mass transfer in facilities with a moving piston. *Heat Transfer Research*, 2007, vol. 38, no. 3, pp. 233–243.

17. Shook C.A., Roco M.C. *Slurry flow: principles and practice*. London, UK, Butterworth-Heinemann, 1991. 324 p.
18. Kharlamov S.N., Kim V.Yu., Silvestrov S.I. Numerical modelling of a vortical investigation of heat transfer in fields of centrifugal mass forces in elements of the power equipment with a curvilinear wall. *The 5th Proceedings of the International Forum on Strategic Technology (IFOST-2010)*. Ulsan, Korea, October 13–15, 2010, pp. 105–109.
19. Nigmatulin R.I., Khabeev N.S., Nagiev F.B. Dynamics, heat and mass transfer of vapour–gas bubbles in a liquid. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1981, vol. 24, no. 6, pp. 1033–1041.
20. Sommerfeld M. *Theoretical and experimental modeling of particulate flows: overview and fundamentals*. P. I–II. Lectures Series 2000–6. Karlsruhe, Germany, Von Karman Institute for Fluid Dynamics, 2000. 60 p.
21. Crowe C.T., Sommerfeld M., Tsuji Y. *Fundamentals of gas-particle and gas-droplet flows*. Boca Raton, USA, CRC Press, 1998. 179 p.
22. Kruggel-Emdem H., Rikelt S., Wirtz S., Scherer V. A study on the validity of the multi-sphere discrete element method. *Powder Technology*, 2008, vol. 188, no. 2, pp. 153–165.
23. Akhshik S., Behzad M., Rajabi M. CFD-DEM simulation of the hole cleaning process in a deviated well drilling: the effects of particle shape. *Particology*, 2016, vol. 25, pp. 72–82.
24. Lain S., Sommerfeld M. Euler/Lagrange computations of pneumatic conveying in a horizontal channel with different wall roughness. *Powder Technology*, 2008, vol. 184, pp. 76–88.
25. Mei K. An approximate expression for the shear lift force on a spherical particle at finite Reynolds number. *International Journal of Multiphase Flow*, 1992, vol. 18, no. 1, pp. 145–147.
26. Kuang S.B., Yu A.B., Zou Z.S. Computational study of flow regimes in vertical pneumatic conveying. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 2009, vol. 48, no. 14, pp. 6846–6858.
27. Di Renzo A., Di Maio F.P. Comparison of contact-force models for the simulation of collisions in DEM-based granular flow codes. *Chemical Engineering Science*, 2004, vol. 59, no. 3, pp. 525–541.
28. Chien S.F. Settling velocity of irregularly shaped particles. *SPE Drilling and Completion*, 1994, vol. 9, no. 4, pp. 281–289.
29. Alexandrou A.N., Le Menn P., Georgiou G., Entov V. Flow instabilities of Herschel–Bulkley fluids. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 2003, vol. 116, no. 1, pp. 19–32.
30. Saffman P.G. The lift on a small sphere in a slow shear flow. *Journal of Fluid Mechanics*, 1965, vol. 22, no. 2, pp. 385–400.
31. Oesterle B., Bui D.T. Experiments on the lift of a spinning sphere in a range of intermediate Reynolds numbers. *Experiments in fluids*, 1998, vol. 25, no. 1, pp. 16–22.
32. Bilgesu H.I., Ali M.W., Aminian K., Ameri S. *Computational Fluid Dynamics (CFD) as a tool to study cutting transport in wellbores*. The Eastern Regional Meeting of the Society of Petroleum Engineers. Lexington, Kentucky, USA, October 2002. 27 p.
33. Mishra Nekkhal. *Investigation of hole cleaning parameters using computational fluid dynamics in horizontal and deviated wells*. Graduate Theses. USA, 2007. 76 p.
34. Erdal F.M., Shirazi S.A., Shoham O., Kouba G.E. CFD simulation of single-phase two-phase flow in gas-liquid cylindrical cyclone separators. Paper SPE 36645. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. Denver, CO, October 6–9, 1996. pp. 1–15.
35. Han S.M., Hwang Y.K., Woo N.S., Kim Y.J. Solid–liquid hydrodynamics in a slim hole drilling annulus. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2010, vol. 70, no. 3–4, pp. 308–319.
36. Saggot A.M., Dupuis D.C. A major step in ultra slimhole drilling. *SPE Annual Technical Conference*. New Orleans, September 1994. 10 p.
37. Al-Kayiem H.H., Ismail M.Z.A., Zaki N.M., Elfeel M.E. Simulation of the cuttings cleaning during the drilling operation. *American Journal of Applied Sciences*, 2010, vol. 7, no. 6, pp. 800–806.
38. Pereira F.A.R., Ataíde C.H., Barrozo M.A.S. CFD Approach using a discrete phase model for annular flow analysis. *Latin American applied research*, 2010, vol. 40, no. 1, pp. 53–60.
39. Launder B.E., Spalding D.B. *The numerical computation of turbulent flows. Numerical prediction of flow, heat transfer, turbulence and combustion*. London, Pergamon, 1983. pp. 96–116.
40. Mme U., Skalle P. CFD calculations of cuttings transport through drilling annuli at various angles. *International Journal of Petroleum Science and Technology*, 2012, vol. 6, no. 2, pp. 129–141.
41. Mokhtari M., Ermila M.A., Tutuncu A.N., Karimi M. Computational modeling of drilling fluids dynamics in casing drilling. *SPE Eastern Regional Meeting*. Lexington, Kentucky, USA, October 2012. pp. 1–13.
42. Zhu X.H., Sun C., Tong H. Distribution features, transport mechanism and destruction of cuttings bed in horizontal well. *Journal of Hydrodynamics*, 2013, vol. 25, no. 4, pp. 628–638.
43. Osgouei R.E., Ozbayoglu M.E., Fu T.K. CFD simulation of solids carrying capacity of a newtonian fluid through horizontal eccentric annulus. *ASME 2013 Fluids Engineering Division Summer Meeting*. Incline Village, Nevada, USA, July 2013, pp. 1–9.
44. Sorgun M., Osgouei R.E., Ozbayoglu M.E., Ozbayoglu A.M. Gas–liquid flow through horizontal eccentric annuli: CFD and experiments compared. *ASME-JSME-KSME 2011 Joint Fluids Engineering Conference*. Hamamatsu, Shizuoka, Japan, January 2011, pp. 3847–3852.
45. Demiralp Y. *Effects of drill-pipe whirling motion on cuttings transport performance for horizontal drilling*. Master dissertation. USA, 2014. 151 p.
46. Menter F.R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. *AIAA journal*, 1994, vol. 32, no. 8, pp. 1598–1605.
47. Cundall P.A., Strack O.D. A discrete numerical model for granular assemblies. *Geotechnique*, 1979, vol. 29, no. 1, pp. 47–65.
48. Garcia-Hernandez A.J., Miska S.Z., Yu M., Takach N.E., Zettner C.M. Determination of cuttings lag in horizontal and deviated wells. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. Anaheim, California, USA, November 2017. 11 p.
49. Wilcox D.C. *Turbulence modeling for CFD*. La Canada, California, USA, 1998. Vol. 2, 461 p.
50. Rooki R., Ardejani F.D., Moradzadeh A., Norouzi M. Simulation of cuttings transport with foam in deviated wellbores using computational fluid dynamics. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 2014, vol. 4, no. 3, pp. 263–273.
51. Rooki R., Ardejani F.D., Moradzadeh A., Norouzi M. CFD simulation of rheological model effect on cuttings transport. *Journal of Dispersion Science and Technology*, 2015, vol. 36, no. 3, pp. 402–410.
52. Beyer A.H., Millhone R.S., Foote R.W. Flow behavior of foam as a well circulating fluid. *Proceedings of the Society of Petroleum Engineers of AIME*. San Antonio, Texas, USA, 1972. pp. 1–12.
53. Ozbayoglu E.M., Miska S.Z., Reed T., Takach N. Cuttings transport with foam in horizontal & highly-inclined wellbores. *SPE/IADC Drilling Conference*. Amsterdam, the Netherlands, January 2003. pp. 1–9.
54. Bonilla L.F., Shah S.N. Experimental investigation on the rheology of foams. *Proceedings of the SPE/CERI Gas Technology Symposium*. Calgary, Canada, April 2000. pp. 1–14.
55. Ofei T.N., Pao W. Modelling of pressure drop and cuttings concentration in eccentric narrow horizontal wellbore with rotating drillpipe. *Journal of Applied Sciences*, 2014, vol. 14, no. 23, pp. 3263–3269.
56. Ofei T.N., Irawan S., Pao W. CFD method for predicting annular pressure losses and cuttings concentration in eccentric horizontal wells. *Journal of Petroleum Engineering*, 2014, vol. 115, pp. 1–16.
57. Launder B.E., Dudley B.S. Mathematical models of turbulence. *Journal of Fluid Mechanics*, 1973, vol. 57, Iss. 4, no. 6, pp. 826–828.
58. Ofei T.N., Alhemyari S.A. Computational fluid dynamics simulation of the effect of drill pipe rotation on cuttings transport in horizontal wellbores using a Newtonian fluid. *International Field Exploration and Development Conference*. Xian, China, September 2015. pp. 8–16.
59. Ofei T.N. Effect of yield power law fluid rheological properties on cuttings transport in eccentric horizontal narrow annulus. *Journal of Fluids*, 2016, vol. 139, pp. 11–22.
60. Kamyab M., Rasouli V. Experimental and numerical simulation of cuttings transportation in coiled tubing drilling. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2016, vol. 29, pp. 284–302.
61. Akhshik S., Rajabi M. CFD-DEM modeling of cuttings transport in underbalanced drilling considering aerated mud effects and downhole conditions. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2018, vol. 160, pp. 229–246.
62. Naganawa S., Oikawa A., Masuda Y., Tetsuo Y., Hoshino M., Acuna P. Cuttings transport in directional and horizontal wells while aerated mud drilling. *IADC/SPE Asia Pacific Drilling Technology*. Jakarta, Indonesia, September, 2002. pp. 11–20.

63. Barigou M. Particle tracking in opaque mixing systems: an overview of the capabilities of PET and PEPT. *Chemical Engineering Research and Design*, 2004, vol. 82, no. 9, pp. 1258–1267.
64. Epelle E.I., Gerogiorgis D.I. Transient and steady state analysis of drill cuttings transport phenomena under turbulent conditions. *Chemical Engineering Research and Design*, 2018, vol. 131, pp. 520–544.
65. Epelle E.I., Gerogiorgis D.I. CFD modelling and simulation of drill cuttings transport efficiency in annular bends: effect of particle sphericity. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2018, vol. 170, pp. 992–1004.
66. Syamlal Madhava, O'Brien Th.J. Computer simulation of bubbles in a fluidized bed. *American Institute of Chemical Engineers*, 1989, vol. 85, no. 1, pp. 22–31.
67. Sorgun M. *Modeling of Newtonian fluids and cuttings transport analysis in high inclination wellbores with pipe rotation*. MSc Thesis. Ankara, Turkey, 2010. 177 p.
68. Tomren P.H., Iyoho A.W., Azar J.J. Experimental study of cuttings transport in directional wells. *SPE Drilling Engineering*, 1986, vol. 1, no. 1, pp. 43–56.
69. Hajipour Mastaneh. CFD simulation of turbulent flow of drill cuttings and parametric studies in a horizontal annulus. *Scientific Notes. Applied Sciences*, 2020, vol. 2, pp. 1–12.
70. Shao Bing, Yifei Yan, Xiangzhen Yan, Zhiqian Xu. A study on non-spherical cuttings transport in CBM well drilling by coupled CFD-DEM. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 2019, vol. 13, no. 1, pp. 579–590.
71. Sayindla S., Lund B., Ytrehus J. D., Saasen A. CFD modeling of hydraulic behavior of oil-and water-based drilling fluids in laminar flow. *SPE Drilling & Completion*, 2019, vol. 34, Iss. 3, pp. 171–180.
72. Kelessidis V.C., Dalamarinis P., Maglione R. Experimental study and predictions of pressure losses of fluids modeled as Herschel-Bulkley in concentric and eccentric annuli in laminar, transitional and turbulent flows. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2011, vol. 77, no. 3–4, pp. 305–312.
73. Heydari O., Sahraei E., Skalle P. Investigating the impact of drillpipe's rotation and eccentricity on cuttings transport phenomenon in various horizontal annuluses using computational fluid dynamics (CFD). *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2017, vol. 156, pp. 801–813.
74. Duan M., Miska S., Yu M., Takach N.E., Ahmed R.M., Hallman J.H. Transport of small cuttings in Extended Reach Drilling. *SPE Oil and Gas Conference and Exhibition*. Beijing, China, December 2006. pp. 1–9.
75. Gidaspow D. *Multiphase flow and fluidization: continuum and kinetic theory descriptions*. London, UK, Academic press, 1994. 461 p.
76. Chen Zhu. Experimental study on cuttings transport with foam under simulated horizontal downhole conditions. *SPE Drilling & Completion*, 2007, vol. 22, no. 4, pp. 304–312.
77. Duan M., Miska S., Yu M., Takach N.E., Ahmed R.M., Hallman J.H. Experimental study and modeling of cuttings transport using foam with drillpipe rotation. *SPE Drilling & completion*, 2010, vol. 25, no. 3, pp. 352–362.
78. Ignatenko Y., Bocharov O., Gavrilov A., May R. Steady-state cuttings transport simulation in horizontal borehole annulus. *ASME 2018 37th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*. Madrid, Spain, June 2018, pp. 26–38.
79. Miller R.M., Morris, J.F. Normal stress driven migration and axial development in pressure-driven flow of concentrated suspensions. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 2006, vol. 135, pp. 149–165.
80. Johnson P.C., Jackson R. Frictional collisional constitutive relations for granular materials with application of plane shearing. *Journal of Fluid Mechanics*, 1987, vol. 176, no. 3, pp. 67–93.
81. Pang B., Wang S., Jiang X., Lu H. Effect of orbital motion of drill pipe on the transport of non-Newtonian fluid-cuttings mixture in horizontal drilling annulus. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2019, vol. 174, pp. 201–215.
82. Miska S., Reed T., Kuru E. *Advanced cuttings transport study: final technical report*. (date of issue: September 30, 2004. DOE Award number: DE-FG26-99 BC15178. The University of Tulsa, 600 South College Avenue, Tulsa, Oklahoma 74104). Tulsa, Oklahoma, 2004. 284 p.
83. Busch A., Johansen S.T. Cuttings transport: on the effect of drill pipe rotation and lateral motion on the cuttings bed. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2020, vol. 191, pp. 107–136.
84. Pang B., Wang S., Lu C., Cai W., Jiang X., Lu H. Investigation of cuttings transport in directional and horizontal drilling wellbores injected with pulsed drilling fluid using CFD approach. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2019, vol. 90, pp. 183–193.
85. Shao B., Yan Y., Wang X., Liao F., Yan X. Numerical investigation of a double-circulation system for cuttings transport in CBM well drilling using a CFD-DEM coupled model. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 2020, vol. 14, no. 1, pp. 38–52.
86. Al-Gailani A., Al-Yasiri M., Wen D. Numerical study of cuttings transport of nanoparticle-based drilling fluid. *Engineering Reports*, 2020, no. 2 (e), pp. 12154–12168.
87. Escudier M.P., Nickson A.K., Poole R.J. Turbulent flow of viscoelastic shear-thinning liquids through a rectangular duct: quantification of turbulence anisotropy. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 2009, vol. 160, pp. 2–10.
88. Huque M.M., Butt S., Zendejboudi S., Imtiaz S. Systematic sensitivity analysis of cuttings transport in drilling operation using computational fluid dynamics approach. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2020, vol. 81, no. 103386, pp. 17–38.
89. Zhang F., Wang Y., Wang Y., Miska S., Yu M. Modeling of dynamic cuttings transportation during drilling of oil and gas wells by combining 2D CFD and 1D discretization approach. *SPE Journal*, 2020, vol. 25, Iss. 3, no. 6, pp. 21–42.

Received: 19 April 2021.

Information about the authors

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

Janghorbani Mehran, post-graduate student, National Research Tomsk Polytechnic University.

Konstantin A. Filippov, post-graduate student, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 631.438.2; 544.034.24; 532.5-1/-9

О ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГЛИНОСОДЕРЖАЩИХ БАРЬЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ЛОКАЛИЗАЦИИ ПОСЛЕДСТВИЙ РАДИАЦИОННЫХ АВАРИЙ (НА ПРИМЕРЕ АЭС «ФУКУСИМА-ДАЙТИ»)

Антоненко Михаил Викторович¹,
antonenkomv26@mail.ru

Беспала Евгений Владимирович¹,
bespala_evgeny@mail.ru

Мышкин Вячеслав Фёдорович²,
gos100@tpu.ru

Павлюк Александр Олегович³,
seversknet@rambler.ru

Котляревский Сергей Геннадьевич³,
skotkyarevkiy@rambler.ru

Захарова Елена Васильевна⁴,
zevchem@rambler.ru

Волкова Анна Генриховна⁴,
anna.agv@yandex.ru

Беспала Юлия Рашидовна^{2,1},
yrbespala@gmail.com

¹ Горно-химический комбинат,
Россия, 662972, г. Железногорск, ул. Ленина, 53.

² Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634034, г. Томск, пр. Ленина, 30.

³ АО «Опытно-демонстрационный центр вывода из эксплуатации уран-графитовых ядерных реакторов»,
Россия, 636000, г. Северск, ул. Автодорога 13, 179а.

⁴ Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина Российской академии наук,
Россия, 119071, г. Москва, пр. Ленинский, 31, корп. 4.

Актуальность работы обусловлена необходимостью выбора эффективных подходов и новых инновационных барьерных материалов, обладающих противодиффузионными и противомиграционными свойствами, для локализации последствий аварий на радиационно опасных объектах.

Цель: обзор возможности использования отечественных технологий по локализации радионуклидов внутри пунктов размещения радиоактивных отходов и ядерных материалов (кориума) для решения проблемы миграции радионуклидов на АЭС «Фукусима-Дайти».

Методы: математическое моделирование процесса миграции радионуклидов из разрушенных энергоблоков атомной электростанции «Фукусима-Дайти» (АЭС «Фукусима-Дайти») через глиносодержащие барьеры безопасности.

Результаты. Рассмотрена возможность использования барьерных материалов для локализации последствий радиационных аварий. На основе положительного отечественного опыта предложено использование барьеров безопасности на основе глинистых композиций и гелеобразующих растворов для предотвращения подземной миграции радионуклидов из разрушенных энергоблоков в окружающую среду. В качестве примера такой ситуации выбрана произошедшая 11 марта 2011 г. авария на АЭС «Фукусима-1», которая в настоящее время является объектом для отработки технологий и подходов ликвидации аварий. В работе описаны основные источники радиоактивного загрязнения, образованные в результате аварии на АЭС «Фукусима-Дайти» и распространяющиеся грунтовыми водами, дождевыми потоками и охлаждающей водой, которую закачивают в поврежденные активные зоны. Выявлены недостатки используемой системы барьеров безопасности, основанной на заморозке грунтов. На основе положительного отечественного опыта предложено использование глиносодержащих барьеров безопасности для предотвращения миграции радионуклидов из разрушенных энергоблоков в океан. Для этих целей рассмотрены такие природные материалы, как вермикулит, перлит, цеолит, шунгит, и определены их сорбционные характеристики. Представлены результаты математического моделирования процесса миграции наиболее мобильных радионуклидов (Ри, Cs, Sr, U) через барьерные материалы из глины. Показана возможность использования барьера безопасности на основе смеси глины. При этом ширина такого барьера не превышает 3,7 м (определяется скоростью миграции урана). Общий объем глиносодержащего барьерного материала, необходимого для предотвращения миграции радионуклидов, составляет ~145900 м³. Для замедления миграции трития предложен противодиффузионный барьер на основе гелеобразующего раствора. В качестве геля возможно использование специальных растворов, содержащих продукты разложения геологических пород ийолит-уртитовой группы. В результате разложения в растворе образуются щелочноземельные, переходные и щелочные элементы, ионы Al и H₄SiO₄. Предлагается использовать указанный гель путем его инъекции вокруг энергоблоков АЭС «Фукусима-Дайти». Это позволит полимеризовать ортокремневую кислоту, что приведет к адсорбции катионов Ca, Mg, Fe и гидратированного алюминия.

Ключевые слова:

АЭС «Фукусима-Дайти», авария, барьеры безопасности, глина, миграция, радионуклид.

Введение

Общеизвестно, что 11 марта 2011 г. у берегов Японии в Тихом океане произошло землетрясение, которое

иницировало цунами, высота волны которого была более 10 м. В результате столкновения цунами с берегом северо-восточной части острова Хонсю было

нарушено функционирование системы охлаждения реакторов типа BWR на атомной электростанции «Фукусима-Дайити», расположенной в городе Окума уезда Футаба префектуры Фукусима [1–4]. В момент землетрясения три энергоблока были остановлены, но состояние штатных систем безопасности станции в наступивших условиях не позволило организовать достаточное аварийное охлаждение активных зон. Процесс остаточного энерговыделения сопровождался интенсивным парообразованием. Вследствие взаимодействия пара с циркониевыми конструкционными элементами происходило накопление водорода (пароциркониевая реакция) [5, 6] в активных зонах реакторов. Согласно данным, представленным в работе [7], количество водорода в энергоблоке I-1 за первые 10000 секунд после аварии возросло до 450 кг, а в I-3 – 1200 кг.

В результате накопления водорода в активной зоне реактора 12 марта на первом энергоблоке АЭС «Фукусима-Дайити» произошёл взрыв. В последующие дни аналогичным образом были повреждены энергоблоки I-2 и I-3. Согласно сравнительному анализу последствий аварии на Чернобыльской АЭС и на «Фукусима-Дайити», представленному в работе [8], общее радиоактивное загрязнение в результате последнего инцидента составило $\sim(340\text{--}800)\cdot 10^{15}$ Бк. К основным радионуклидам, поступившим в окружающую среду, можно отнести: ^{85}Kr – 44 ПБк [9]; ^{133}Xe – 14 ПБк [10]; ^{132}Te – 180 ПБк [8]; ^{131}I – (65,2–380) ПБк [11, 12]; ^{133}I – 146 ПБк [8]; $^{134+136+137}\text{Cs}$ – до 92,5 ПБк [13–15]; $^{239+240}\text{Pu}$ – $(1\text{--}2,4)\cdot 10^{-6}$ ПБк [16]; ^{241}Pu – $(1,1\text{--}2,6)\cdot 10^{-4}$ ПБк [16]. В результате аварии область диаметром ~ 60 км получила обширное радиоактивное загрязнение с плотностью, например, по ^{137}Cs более 3000 кБк/м² [17]. В настоящее время после распада короткоживущих радионуклидов основной вклад в загрязнение вносят радионуклиды $^{239,240,241}\text{Pu}$, $^{235,238}\text{U}$, $^{134,137}\text{Cs}$, ^{90}Sr , ^3H и др.

Радиоактивные продукты деления и активации из активной зоны реакторов I-1, I-2, I-3 под действием

взрывной волны, ветра и выпадения атмосферных осадков осели в прилегающих к станции горных массивах и лесах [18]. В настоящее время вместе с грунтовыми водами и дождевыми потоками радионуклиды поступают в океан. При этом, несмотря на принятые меры по удалению поверхностного слоя грунта, количество поступающих в океан радиоизотопов цезия практически не сократилось [19]. Данный факт свидетельствует либо о более глубоком загрязнении почвы, либо о наличии очагов преобладающей локализации радионуклидов с неконтролируемым поступлением в окружающую среду.

Другим источником радиоактивной воды, поступающей в Тихий океан, стало реакторное пространство с ядерным топливом в виде кориума, которое требует длительного охлаждения. В результате поступления жидкости в активную зону шли процессы выщелачивания и миграции за пределы реакторного пространства практически всех имеющихся радионуклидов из кориума, остатков топлива и конструкционных элементов [20, 21]. Через трещины и под действием капиллярного движения влаги через почву вода достигала океана [22, 23].

Для предотвращения дальнейшего загрязнения грунтовых вод и попадания радиоактивного загрязнения в Тихий океан эксплуатирующая компания ТЕРСО в 2015 г. принимает решение заморозить грунт (снимок Google Maps [24] на рис. 1). На исходный рисунок из Google Maps были нанесены линии, означающие следующее: красная линия – периметр размещения энергоблоков, голубая линия – первый периметр заморозки грунта, оранжевая линия – второй периметр заморозки грунта. Слой почвы, прилегающий к энергоблокам, замораживали путем подачи циркулирующего хладагента в морозильные трубы, установленные по периметру месторасположения АЭС на глубине ~ 30 м [25]. В конце марта 2016 г. практически полностью была завершена заморозка грунта со стороны берега (оранжевая линия).

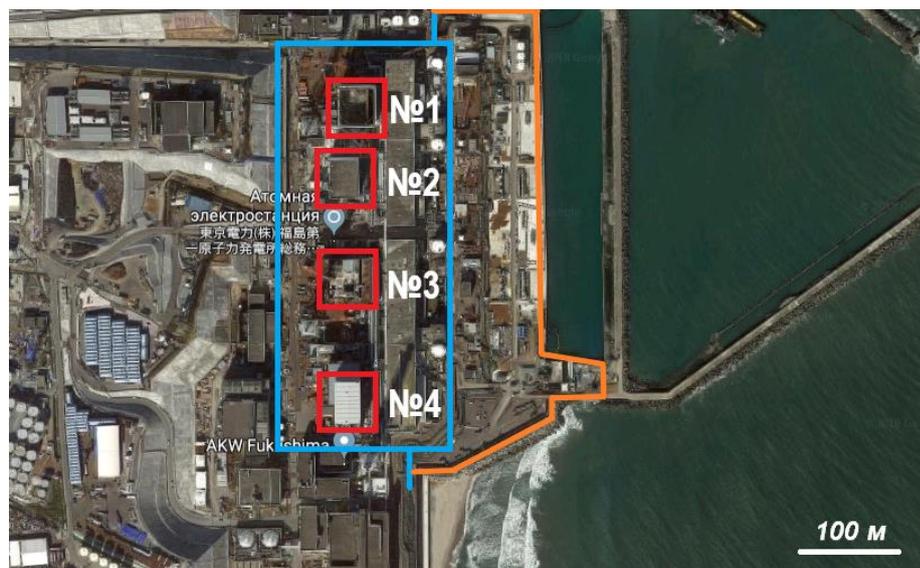


Рис. 1. Схема заморозки грунта в месте аварии на АЭС «Фукусима-Дайити»

Fig. 1. Scheme of ground frost at the accident site at the Fukushima Daiichi NPP

Однако использование системы заморозки грунта с целью предотвращения миграции радионуклидов в океан представляется энергозатратной из-за необходимости непрерывной циркуляции хладагента с помощью насосов. В настоящее время данная технология рассматривается как временная мера предотвращения миграции до разработки и применения технологий извлечения урана из реакторов. Работы по извлечению топлива предполагается осуществить в ближайшие 10–15 лет.

При этом необходимо учитывать, что в случае невозможности завершения работ по извлечению топлива в краткосрочный период, вероятно, возникнет потребность в применении более экономичной и надежной системы длительного сдерживания радионуклидов. Для этого целесообразно рассматривать применение геологически совместимых со средой природных барьерных материалов или комбинацию барьерного материала с замороженным грунтом, что является глубоко эшелонированной защитой [26]. К таким барьерам, прежде всего, относится глина [27–29].

Стоит отметить, что уже ранее предлагалось использовать бентонитовую глину для создания барьеров безопасности непосредственно в корпусе реактора и изоляции радионуклидов внутри него [30, 31]. Было определено, что гидравлическая проводимость используемого бентонита составляет 10^{-10} – 10^{-8} м/с. При этом не было показано, что предлагаемый барьерный материал обладает противомиграционными свойствами. Более того, экспериментальное моделирование процесса локализации расплавленного ядерного топлива выявило нестабильность и ухудшение гидроизоляционных свойств бентонитовой глины. Заполнение реакторных пространств в текущих условиях является сложнейшей инженерно-технической задачей, связанной с большими дозовыми нагрузками на работающий персонал и задействованное оборудование. Поэтому целесообразно создавать барьеры безопасности за пределами места размещения разрушенной реакторной установки.

Опыт использования глиносодержащих барьерных материалов в России

По номенклатуре Международной минералогической ассоциации (ММА) глинистые минералы относятся к силикатам (подкласс филлосиликатов) и содержат две группы [32]. Эти группы различаются по количеству тетраэдрических и октаэдрических сеток – 1:1 (каолинит, галлуазит, лизардит, бертьерин и др.) или 2:1 (группа истинных слюд (мусковит, биотит, флогопит и др.), слюды с дефицитом межслоя (иллит, глауконит), смектиты (монтмориллонит, сапонит и др.), вермикулиты (вермикулит), группа хлоритов (клинохлор, шамозит и др.)), а также по количеству изоморфных замещений, определяющих заряд слоя. Минералы типа 1:1 имеют низкие емкость и набухаемость, а также высокую водопроницаемость (высокая диффузия). Минералы типа 2:1 содержат катионы и молекулы воды в составе межслоевого промежутка (межслоя). Каолиниты характеризуются низкой емкостью катионного обмена, слабой набухаемо-

стью и противодиффузионными свойствами. Минералы группы смектита, в первую очередь монтмориллонит (имеющий относительно низкий заряд слоя и локализацию изоморфных замещений в октаэдрическом слое), способны к внутрикристаллическому набуханию и хорошо сорбируют катионы и анионы на базальной поверхности и боковых сколах. На рис. 2 приведены два слоя атомов, формирующих иллит. Слои глинистых минералов объединяются в объемное тело за счет межмолекулярных сил, обусловленных нескомпенсированными зарядами на базальных (плоских) поверхностях каждого слоя [33, 34]. Это связано с тем, что отрицательно заряженные центры двух слоев притягиваются за счет взаимодействия с межслоевыми ионами K^+ . При этом содержащийся в природной глине K^+ может заменяться на ионы щелочных или щелочноземельных металлов, удерживаемых внутри минерала глины.

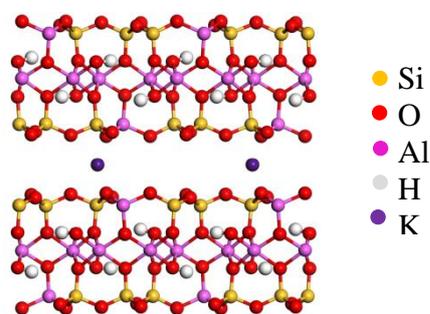


Рис. 2. Молекулярная модель фрагмента двух слоев минерала иллита

Fig. 2. Molecular model of a fragment of illite mineral two layers

Глиносодержащие материалы широко применяются в Российской Федерации для создания искусственных барьеров безопасности в пунктах хранения и захоронения РАО. Наиболее показательным является использование глин при выводе из эксплуатации промышленного уран-графитового реактора (ПУГР) ПУГР ЭИ-2, расположенного в г. Северске Томской области, по варианту «Захоронение на месте» [35, 36], а также ПУГР АД, расположенного в г. Железногорске Красноярского края [37, 38]. Планируется использование схожих по составу глиносодержащих барьеров безопасности для вывода из эксплуатации ПУГР АДЭ-1 и И-1.

Кроме того, глиносодержащие барьерные материалы использовались для ликвидации водоемохранилищ жидких РАО. С целью сокращения поступления радиоактивных аэрозолей в атмосферу и загрязнения подземных вод был сначала законсервирован, а потом выведен из эксплуатации с применением глин и суглинков водоем В-9 (Карачай), расположенный на промышленной площадке ФГУП «ПО «Маяк» (Челябинская область) [39, 40]. Также путем создания послойной засыпки из защитного барьерного материала (экрана и внешних барьеров безопасности) был выведен из эксплуатации бассейн-хранилище жидких РАО № 354 ФГУП «ГХК», планируется создание глинистых барьеров безопасности в объекте 365.

В ходе проведенных научно-исследовательских работ установлено, что уплотненные свыше $1,5 \text{ г/см}^3$ образцы выбранного глиняного материала практически непроницаемы для воды. При этом содержание илистой фракции в образцах изменяется от 18 до 28 % мас., тонкопылеватой фракции – от 34 до 50 % масс., то есть значительная часть породы состоит из тонкодисперсного материала, емкость катионного обмена больше 30 мг-экв./100 г породы.

В илистой фракции образцов преобладают лабильные минералы (смектит, смешаннослойным иллит-смектит, вермикулит), в крупных и средних фракциях – железосодержащие фазы (самостоятельные агрегаты, пленки) и глинистые агрегаты, обладающие высокой сорбционной способностью. Многообразие типов кристаллических решеток и их структурных особенностей обеспечивает различные механизмы сорбции радионуклидов на минералах, слагающих исследуемую глину, что обеспечивает надежность фиксации на ней радионуклидов. Среди механизмов сорбции, в первую очередь, можно выделить: формирование комплексообразующих соединений с гидроксильными группами на поверхности минерала; обмен ионами; осаждение нерастворимых соединений на поверхности сорбента (адсорбция). Детальный анализ минералогического состава свидетельствует о перспективе использования образцов глины в качестве барьерных материалов: с одной стороны, многообразие вакантных позиций для сорбции, с другой – высокое содержание тонкодисперсного материала, что значительно снижает его водопроницаемость за счет заиливания тонкодисперсными частицами межзерновых каналов. При этом большая часть радионуклидов ^{137}Cs , ^{90}Sr , ΣU и ΣPu сорбируется на барьерном материале за счёт ионообменной сорбции, скорость которой зависит от термодинамики обмена, состава и концентрации среды переноса (раствора), от природы катиона и катионной формы глины. Стоит отметить, что наиболее эффективно катионный обмен происходит из нейтральных растворов, поскольку у катионов металлов отсутствует конкуренция с H^+ за активные центры.

Стоит отметить, что имеется положительный опыт использования слабонабухающих минералов (иллит, вермикулит) с целью сорбции радионуклидов ^{137}Cs и ΣPu [41, 42]. Сорбция ионов цезия и плутония на барьерных материалах, содержащих указанные минералы, приводит к их необратимой фиксации, поскольку происходит внедрение в тетраэдрические слои, состоящие из SiO_2 . Выщелочить ионы цезия и плутония из минералов можно только с помощью очень активных реагентов.

Проведенное исследование свойств широкого спектра глинистых составов привело к выводам, что барьерный материал на основе природных глин должен иметь следующие характеристики:

- влажность в диапазоне 3–4 % мас.;
- содержание фракции с размером частиц $<0,1 \text{ мм}$ не менее 80 % мас. от общего количества материала;

- емкость катионного обмена более 20 мг-экв./100 г материала;
- фактор задержки не менее 100;
- коэффициент распределения нуклидов плутония, цезия и урана более $7 \cdot 10^2 \text{ см}^3/\text{г}$;
- размер зерен во фракциях, определяющих минералогический состав барьерного материала: $<0,01 \text{ мм}$ более 50 % мас.; содержание фракции с размером частиц $<0,005 \text{ мм}$ не менее 40 % мас.

Подобный глиносодержащий барьерный материал может рассматриваться в качестве основы для создания барьеров безопасности для изоляции основных объектов локализации радионуклидов разрушенных энергоблоков АЭС «Фукусима-Дайити», поскольку он обладает высокими емкостными, противодиффузионными и противомиграционными характеристиками. Барьер может быть сооружен либо путем нагнетания самоотверждающегося глинистого раствора, либо путем бесполостного заполнения пространств (имеющихся или создаваемых) самоуплотняющейся сухой мелкодисперсной смесью в местах локализации основных источников поступления радионуклидов.

Для задержки наиболее подвижных радионуклидов (^{137}Cs , ^{90}Sr , ΣU , ΣPu) возможно создание проницаемых барьеров безопасности на основе вермикулита, перлита, цеолита и шунгита. Коэффициенты распределения радионуклидов K_d на описанных материалах представлены в работах [43–45] и приведены в табл. 1.

Представленные в табл. 1 барьерные материалы обладают рядом особенностей. Так, практически каждый из них содержит неорганическую минеральную составляющую. При этом вермикулит содержит в своем составе магний, железо, кремний, алюминий и обладает высоким коэффициентом водопоглощения (100 г вермикулита способны поглотить 400–530 мл воды). Перлит и цеолит состоят из алюмосиликатов (до 16 %) и способны впитывать жидкость до 400 % от собственного веса. В шунгите преимущественно содержатся оксиды кремния (до 37 %), органические вещества (до 27 %) и оксиды алюминия (до 5 %), что делает его универсальным и эффективным средством для очистки воды.

Таблица 1. Коэффициент межфазного распределения K_d радионуклидов на различных барьерных материалах, [$\text{см}^3/\text{г}$]

Table 1. Coefficient of interphase distribution of K_d radionuclides on various barrier materials, [cm^3/g]

| Радионуклид/Radionuclide | Pu | Cs | Sr | U |
|--------------------------|-----------------|------------------|------------------|-----|
| Вермикулит/Vermiculite | $30 \cdot 10^3$ | $2 \cdot 10^5$ | $2 \cdot 10^4$ | 179 |
| Перлит/Perlite | $15 \cdot 10^3$ | 840 | 8 | 64 |
| Цеолит/Zeolite | $17 \cdot 10^3$ | $2,2 \cdot 10^5$ | $6,2 \cdot 10^3$ | 67 |
| Шунгит/Shungite | $40 \cdot 10^3$ | 306 | 7 | 206 |

Моделирование процесса миграции радионуклидов

Согласно современным представлениям о физико-химических механизмах массопереноса радионуклидов, миграция происходит вследствие конвекции и диффузионно-дисперсионного рассеяния. При этом

конвективный перенос, обусловленный гидравлическим градиентом, является основным механизмом распространения радионуклидов в почве. Так, в месте аварии на АЭС «Фукусима-Дайити» гидравлический градиент создается за счёт заполнения реакторного пространства разрушенных энергоблоков водой с целью охлаждения расплавленного топлива. В первый период времени ликвидации аварии в повреждённые реакторы закачивается 300 м³ морской воды в сутки. Ситуация осложняется тем, что помимо искусственного охлаждения происходит выпадение осадков в количестве (1100–1800) мм/год и поступление грунтовых вод в место аварии [46]. Таким образом, объёмная скорость поступления радиоактивной воды из каждого энергоблока в океан составляет ~600 м³/сутки [47].

При малых скоростях фильтрации особенно важен молекулярно-диффузионный перенос. Молекулярная диффузия приводит к выравниванию концентрации, в результате чего происходит перемещение вещества из более проницаемых областей в менее проницаемые области (при миграции в гетерогенных пластах глины). В результате образуются т. н. переходные зоны, в которых меняется концентрация радионуклидов и замедляется скорость их миграции [48]. Это особенно характерно для смеси глин.

Таким образом, возникает необходимость решать задачу, в которой учитывается конвективный и диффузионный перенос радионуклидов. Моделирование процесса массопереноса радиоактивного загрязнения в системе бетонное основание здания реактора – глиносодержащий барьерный материал проводилось с помощью второго закона Фика.

Решали одномерное уравнение конвективной диффузии в прямоугольной системе координат (1). При этом учитывали снижение удельной активности диффундирующих радионуклидов за счёт радиоактивного распада и фильтрационного движения жидкости (влаги), содержащей радионуклиды [49]:

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = D_i \frac{\partial^2 C_i}{\partial x^2} - u_i \frac{\partial C_i}{\partial x} - \lambda_i C_i, \quad 0 < x < L_1, \quad (1)$$

где C_i – концентрация (удельная активность) i -го радионуклида в глиносодержащем барьере безопасности, Бк/м³; D_i – коэффициент диффузии i -го радионуклида в барьере безопасности, м²/с; u_i – скорость движения i -го радионуклида в барьере безопасности (с учетом влаги, поступающей при охлаждении активной зоны, вместе с осадками, и грунтовых вод, а также сорбции радионуклидов на материале барьера), м/с; λ_i – постоянная распада, с⁻¹; t – время, с.

Считали, что на левой границе концентрация (удельная активность) i -го радионуклида уменьшается только за счёт радиоактивного распада (2):

$$C_i|_{x=0} = c_i \exp(-\lambda t). \quad (2)$$

Значения величины c_i для различных радионуклидов на границе расчетной области (бетонное основание здания реактора – глиносодержащий барьерный материал) представлены в работах [50, 51]. Так, удельная активность ΣPu составляет 490 Бк/м³, ΣCs – 1,29·10⁹ Бк/м³, ^{90}Sr – 1,14·10⁶ Бк/м³, ΣU – 940 Бк/м³.

Граничное условие (3) выбиралось с учётом допущения, что через время, сравнимое с периодом полураспада рассматриваемого радионуклида, он будет гарантировано отсутствовать:

$$C_i|_{x=L_1} = 0. \quad (3)$$

В начальный момент времени t_0 концентрация (удельная активность) составляла c_i . Скорость движения i -го радионуклида в барьере безопасности с учетом коэффициентов сорбции определялась из уравнения, представленного в работах [52, 53]. Более подробное описание математической модели можно найти в работе [54].

Известно, что глинистые минералы обладают ионообменными свойствами. Эмпирическое соотношение (4) из работы [55] использовали для расчёта коэффициента внутренней диффузии в глинистом барьере безопасности в процессе сорбции:

$$a_i = D_i \sqrt{t}, \quad (4)$$

где a_i – величина сорбции, ммоль/г за время t ; D_i – константа скорости внутренней диффузии, ммоль·г⁻¹·с^{-0,5}; t – время сорбции, с.

Общезвестно, что распределение радионуклидов между твердой (сорбированное) и жидкой (растворенное) фазами в равновесии описывается при помощи коэффициента распределения (K_d). Указанный коэффициент определяется как отношение концентрации сорбированного вещества к концентрации растворенного вещества после достижения равновесия между растворенной и сорбированной фазами. Значение K_d (5) может быть определено по экспериментальным данным с помощью формулы [55]:

$$K_d = \frac{Q}{A} = \left(\frac{C_0}{C} - 1 \right) \frac{V}{M}, \quad (5)$$

где Q и A – массовая концентрация (в мг/г) в сорбенте и концентрация в растворе (в мг/мл) в конце эксперимента соответственно; C_0 и C – начальная и равновесная концентрации в растворе; V – объем жидкости, мл; M – масса сорбента, г.

Обсуждение результатов расчета

Расчёт скорости миграции проводили при различной ширине глиносодержащего барьера безопасности L . При этом полагали, что барьер вплотную прилегает к нижней части бетонного основания здания, в котором размещаются энергоблоки АЭС «Фукусима-Дайити». Результаты расчёта профиля концентрации радионуклидов в различных барьерных материалах через 10 лет после создания глиносодержащего барьера безопасности представлены на рис. 3. Из 3, а видно, что на барьерном материале на основе вермикулита эффективно сорбируются радионуклиды Pu, Sr, Cs. При этом для предотвращения их попадания в океан достаточно создать барьер шириной не более 1,2 м. Общий объём используемого барьерного материала в этом случае составляет 47000 м³. Однако вермикулит обладает невысокой сорбционной способностью по отношению к изотопам урана, которые являются долгоживущими (^{238}U , $T_{1/2}=4,5 \cdot 10^9$ лет; ^{235}U , $T_{1/2}=7,13 \cdot 10^8$ лет;

$U-234 T_{1/2}=2,48 \cdot 10^5$ лет). В течение 10 лет после аварии СУ способны мигрировать на расстояние более 14 м от здания размещения реакторов. В этом случае для создания барьеров безопасности потребуется $\sim 591000 \text{ м}^3$ глиносодержащего барьерного материала. С другой стороны, расстояние между зданием размещения реактора и местом разгрузки грунтовых вод составляет $\sim 110 \text{ м}$, что говорит о невозможности попадания изотопов урана в океан во время ликвидации аварии. Это позволяет рассматривать данный барьерный материал в качестве возможного для использования на АЭС «Фукусима-Дайити».

Для создания противомиграционных барьеров безопасности менее подходящими являются глиносодержащие барьерные материалы на основе перлита (рис. 3, б). Связано это с тем, что данные барьеры практически не задерживают радионуклид ^{90}Sr , который достигнет места разгрузки грунтовых вод на третий год после создания барьеров безопасности. При этом для задержки других радионуклидов потребуется глиносодержащий барьер толщиной $\sim 40 \text{ м}$, а общий объем затраченного материала составит 1576800 м^3 , что является нецелесообразным в услови-

ях сильных радиационных полей. Глины на основе цеолита более эффективны, чем на основе перлита, но менее эффективны, чем на основе вермикулита (рис. 3, в). Для задержки Pu потребуется барьер шириной 0,2 м, Cs – 1,2 м, Sr – 1,5 м и U – 38 м. Вследствие малой сорбционной способности урана требуется $\sim 1498000 \text{ м}^3$ барьерного материала для предотвращения попадания радионуклидов в океан в первые 10 лет после создания барьера безопасности. Однако наиболее непригодным барьерным материалом является шунгит (рис. 3, з), несмотря на то, что он используется для очистки воды в промышленности. Связано это с тем, что радионуклид ^{90}Sr достигнет места разгрузки грунтовых вод в течение 2,5 лет после установки барьера. С другой стороны, глиносодержащие барьеры безопасности на основе шунгита способны эффективно задерживать изотопы урана.

Таким образом, использование по отдельности в качестве барьерных природных материалов на основе вермикулита, перлита, цеолита и шунгита при ликвидации аварии на АЭС «Фукусима-Дайити» неэффективно с точки зрения их малой сорбционной способности части радионуклидов.

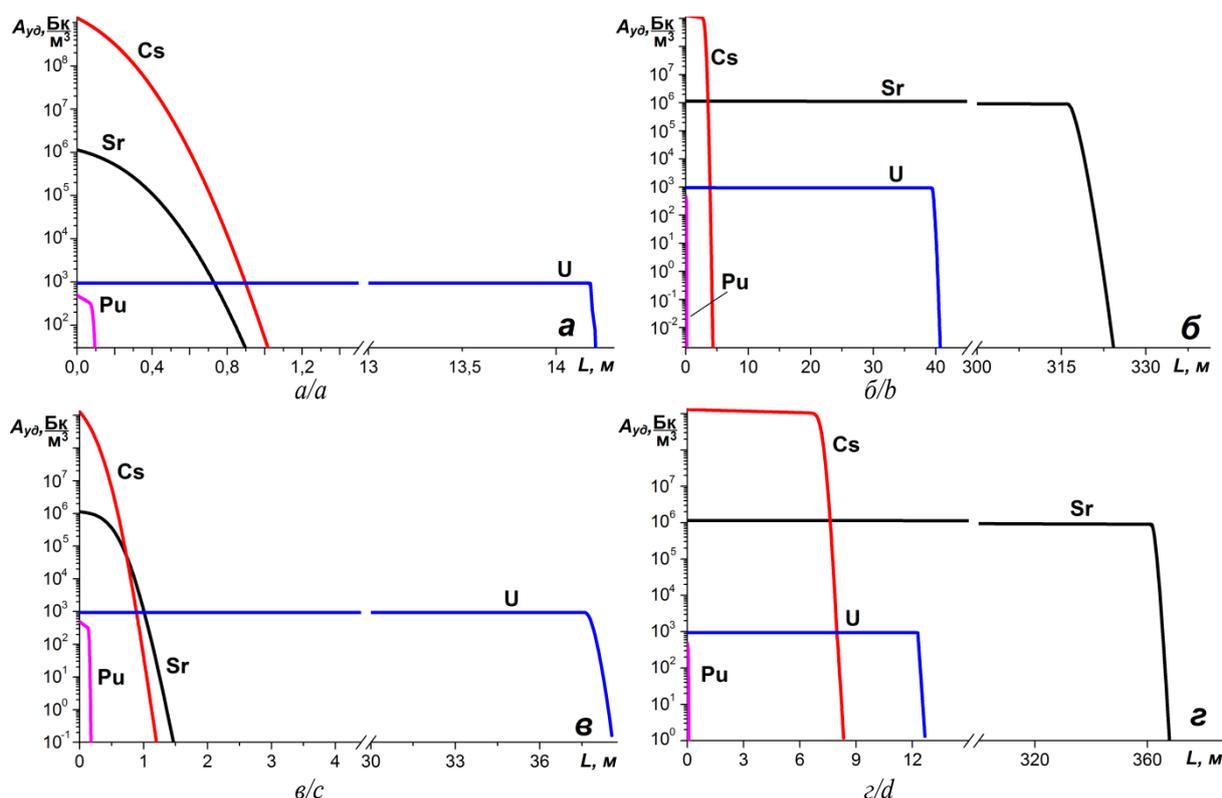


Рис. 3. Профиль концентрации радионуклидов через 10 лет после аварии на АЭС «Фукусима-Дайити» в различных материалах: а) вермикулит; б) перлит; в) цеолит; з) шунгит

Fig. 3. Radionuclide concentration profile for 10 years after the accident at the Fukushima Daiichi NPP in various materials: a) vermiculite; b) perlite; c) zeolite; d) shungite

Практически все РАО содержат тритий и более тяжелые радионуклиды. Так как ионы металлов вытесняют ионы водорода из глинистых минералов, тритий свободно диффундирует через слой глины. Фиксация трития глиной возможна в кислой среде [56, 57]. При этом катионы металлов слабо задержи-

ваются глиной. Поэтому представляется логичным использование нескольких слоев разных видов глин, модифицированных для сорбции заданного класса катионов, или смеси разных глинистых минералов, а также их комбинации с добавлением различных связующих веществ. Такие барьерные материалы ис-

пользовались при выводе из эксплуатации ПУГР ЭИ-2 и АД. Результаты расчёта профиля концентрации в барьерном материале на основе смеси глин представлены на рис. 4.

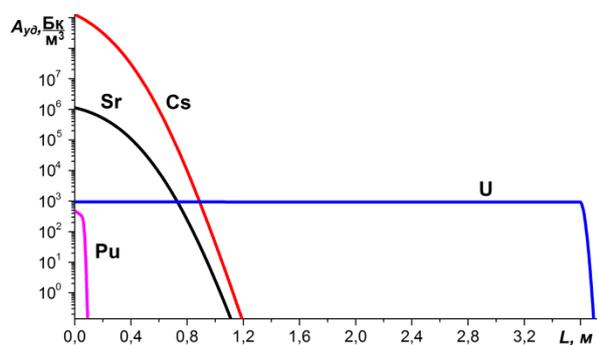


Рис. 4. Профиль концентрации радионуклидов через 10 лет после аварии на АЭС «Фукусима-Дайити» в барьерном материале на основе смеси глин

Fig. 4. Radionuclide concentration profile for 10 years after the accident at the Fukushima-Daiichi NPP in barrier material based on a mixture of clays

Как видно из рис. 4, барьерный материал на основе смеси глин обеспечивает достаточно высокую сорбцию радионуклидов. При этом ширина такого барьера не превышает 3,7 м (определяется скоростью миграции урана). Общий объём глиносодержащего барьерного материала, необходимого для предотвращения миграции радионуклидов, составляет $\sim 145900 \text{ м}^3$. Возможны другие смеси и комбинации глин для достижения более эффективной сорбции радионуклидов. Однако в конечном счёте выбор материала будет зависеть от стоимости его производства и создания барьеров безопасности. Тем не менее использование глин выглядит более привлекательным по причине отсутствия эксплуатационных расходов по сравнению с заморозкой грунта, поскольку затраты на эксплуатацию барьеров в течение всего срока службы минимальны.

Кроме того, барьерный материал на основе природных глин может быть восстановлен при его маловероятной деградации на границе области раствор-барьер или осушен в случае обводнения, например электроосмотическим методом [58].

Глинистые материалы могут переходить из одного вида в другой [59]. Даже в составе одного минерала возможно одновременное существование двух видов глинистых минералов, обусловленных наличием молекул воды и различных катионов внутри кристаллита глинистого минерала [60].

Возможные пути решения проблемы миграции трития

Несмотря на перспективы использования глиносодержащих барьерных материалов для локализации последствий аварии на АЭС «Фукусима-Дайити», возникает проблема удержания радионуклида ^3H внутри разрушенных энергоблоков и хранилищ. При наличии других катионов радионуклид ^3H ($T_{1/2}=12,3$ лет) не сорбируется в глиносодержащих барьерах и в бетонных конструкциях. Соответственно скорость распространения ^3H определяется параметрами миграции

грунтовых вод. Поэтому необходим поиск смешанных глинистых минералов, позволяющих одновременно сорбировать катионы водорода, металлов, а также анионы. Предварительные результаты могут быть получены средствами молекулярного моделирования.

Тритий в кипящем водо-водяном реакторе образуется в основном при тройном делении тяжёлых ядер ^{238}U и ^{239}Pu и в меньшей степени при захвате нейтрона ядром дейтерия, а также по реакциям $^7\text{Li}(n,\alpha)^3\text{H}$ и $^{10}\text{B}(n,2\alpha)^3\text{H}$. До аварии ежегодно в каждом энергоблоке генерировалось до 1 ПБк/ГВт [61]. После взрыва трёх первых энергоблоков количество выделившегося радионуклида ^3H составило 3,4 ПБк (1–1,2 ПБк на каждый энергоблок). При этом 0,8 ПБк находилось в технологических емкостях и бассейнах выдержки, 0,05 ПБк – в застойной воде внутри разрушенных активных зон и турбинных цехов, 0,05 ПБк – в подземных трубопроводах [62]. Удельная активность трития в застойной воде в июне 2011 г. составляла (0,7–20) МБк/л. В настоящее время общий объём воды (в том числе с ^3H) в резервуарах-хранилищах на площадке АЭС «Фукусима-Дайити» составляет около 460000 м^3 [63].

На сегодняшний день рассматриваются различные способы очистки накопленной радиоактивной воды от трития. Например, была предложена технология ректификации с использованием противоточных колонн, а также двухтемпературного и одностепенного химического изотопного обмена [64]. Однако реализация предложенных методов требует организации системы обращения и транспортировки ЖРО, что может привести к миграции радионуклидов через создаваемые или созданные барьеры безопасности.

Для снижения миграции трития может быть использован, например, разработанный в России противифльтрационный барьер на основе гелеобразующего раствора [65]. В качестве геля используют раствор кислоторастворимых продуктов разложения пород группы иолита-уртита, который содержит ионы щелочных, щелочноземельных и переходных элементов, а также ионы Al. Данный раствор может быть введён в зону миграции радионуклидов в качестве преграды. В результате полимеризации H_4SiO_4 , а также сорбции катионов Fe, Ca, Mg и гидратированного алюминия будет происходить формирование барьера безопасности. Создание такого барьера возможно путем инъекции гелеобразующего раствора по периметру территории вокруг разрушенных энергоблоков АЭС «Фукусима-Дайити».

В России были созданы опытные участки барьеров вокруг некоторых хранилищ твердых РАО. Последующие наблюдения показали, что в зоне использования противифльтрационного барьера коэффициент фильтрации снизился более чем на 2 порядка.

Заключение

Таким образом, результаты оценки последствий аварии на площадке АЭС «Фукусима-Дайити», анализ российского опыта создания противифльтрационных и противомиграционных барьеров безопасно-

сти, а также результаты моделирования процесса миграции радионуклидов свидетельствуют о целесообразности использования барьерных материалов на основе глинистых композиций и гелеобразующих растворов при ликвидации аварий, подобных аварии на АЭС «Фукусима-Дайити». При этом создание барьеров на основе глинистых композиций наиболее целесообразно в местах очагов преобладающей локализации радионуклидов (шахты реакторов, окружающие конструкции, помещения, коммуникации, хранилища отработавшего ядерного топлива (ОЯТ), технологическое оборудование). Постановка противифльтрационных барьеров на основе гелеобразующих растворов будет наиболее эффективна на пути движения грунтовых вод для организации их обводного движения и обеспечения минимального их контакта со средами в зонах локализации радионуклидов.

Целесообразность создания подобных барьеров безопасности в качестве компенсационных мер по предотвращению неконтролируемого выхода радионуклидов в окружающую среду в условиях последствий рассматриваемой аварии будет определяться рядом критериев, предъявляемых к материалу барьера. А именно:

- постоянство свойств на период сохранения потенциальной опасности объекта изолируемого ядерно и радиационно опасного объекта;
- отсутствие в составе компонентов, способствующих переносу радионуклидов при эксплуатации барьера безопасности;
- низкая проницаемость влаги;

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авария на АЭС «Фукусима-1»: опыт реагирования и уроки / под общей ред. Л.А. Большова. – М.: Наука, 2013. – 246 с.
2. Арон Д.В., Павлова М.В., Панченко С.В. Оценки масштаба социально-экономических последствий аварии на АЭС в префектуре Фукусима // Известия академии наук. Энергетика. – 2013. – № 5. – С. 65–71.
3. Brumfiel G. Fukushima: fallout of fear // Nature. – 2013. – V. 493. – № 7432. – P. 290–293.
4. Tsunami source of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake / Y. Fujii, K. Satake, S. Sakai, M. Shinohara, T. Kanazawa // Earth, Planets and Space. – 2011. – V. 63. – № 7. – P. 815–820.
5. Tong L.L. Hydrogen risk for advanced PWR under typical severe accidents induced by DVI line break // Annals of Nuclear Energy. – 2016. – V. 94. – P. 325–331.
6. Wang D., Cao X. Preliminary analysis of hydrogen distribution during severe accident induced by loss of coolant accident // International Conference on Nuclear Engineering, Proceedings, ICONE. – 2017. – V. 8. DOI: 10.1115/ICONE25-66497.
7. Tanabe F. Analyses of core melt and re-melt in the Fukushima Daiichi nuclear reactors // Journal of Nuclear Science and Technology. – 2012. – V. 49. – № 1. – P. 18–36.
8. Steinhäuser G., Brandl A., Johnson T.E. Comparison of the Chernobyl and Fukushima nuclear accidents: a review of the environmental impacts // Science of the Total Environment. – 2014. – V. 470–471. – P. 800–817.
9. Update and improvement of the global krypton-85 inventory / J. Ahlswede, S. Hebel, J.O. Ross, R. Schoetter, M.B. Kalinowski // Journal of Environmental Radioactivity. – 2013. – V. 115. – P. 34–42.
10. Stohl A., Seibert P., Wotawa G. The total release of xenon-133 from the Fukushima Dai-ichi nuclear power plant accident // Journal of Environmental Radioactivity. – 2012. – V. 112. – P. 155–159.

- низкие коэффициенты диффузии, высокая сорбционная способность;
- стабильность свойств барьера в различных по уровню водонасыщенности породах;
- достаточная несущая способность;
- экологическая безопасность;
- доступность;
- экономическая обоснованность.

Материалы, используемые для создания геотехнических барьеров безопасности, должны удовлетворять условию совместимости с геологической средой, окружающей объект изоляции. В противном случае образуется неравновесная система, в которой возможны процессы, направленные на достижение геохимического равновесия с геологической средой, в которой размещен подлежащий изоляции объект. В результате данных процессов материал созданного барьера может утратить свои полезные свойства.

Следует обратить особое внимание на то, что опыт использования предлагаемых материалов на основе глины в качестве барьеров безопасности характерен для тех районов Российской Федерации, где глинистые составляющие преобладают во вмещающих породах и находятся в геохимическом равновесии с окружающей средой. Соответственно, при подборе материала барьеров безопасности для локализации последствий аварий необходимо учитывать геолого-геохимические и гидрологические условия на площадке, где предполагается сооружение барьера, а также характеристики источников загрязнения.

11. Ten Hoeve J.E., Jacobson M.Z. Worldwide health effects of the Fukushima Daiichi nuclear accident // Energy and Environmental Science. – 2012. – № 5. – P. 8743–8757.
12. Estimation of errors in the inverse modeling of accidental release of atmospheric pollutant: application to the reconstruction of the cesium-137 and iodine-131 source terms from the Fukushima Daiichi power plant / V. Winiarek, M. Bocquet, O. Saunier, A. Mathieu // Journal of Geophysical Research: Atmosphere. – 2012. – V. 117. – P. 1–16.
13. Hamada N., Ogino H. Food safety regulations: what we learned from the Fukushima nuclear accident // Journal of Environmental Radioactivity. – 2012. – V. 111. – P. 83–99.
14. Preliminary estimation of release amounts of ¹³¹I and ¹³⁷Cs accidentally discharged from the Fukushima Daiichi nuclear power plant into the atmosphere / M. Chino, H. Nakayama, H. Nagai, H. Terada, G. Katata, H. Yamazawa // Journal of Nuclear Science and Technology. – 2011. – V. 48. – № 7. – P. 1129–1134.
15. Xenon-133 and caesium-137 releases into the atmosphere from the Fukushima Dai-ichi nuclear power plant: determination of the source term, atmospheric dispersion, and deposition / A. Stohl, P. Seibert, G. Wotawa, D. Arnold, J.F. Burkhar, S. Eckhardt // Atmospheric Chemistry and Physics. – 2011. – V. 11. – P. 28319–28394.
16. Isotopic evidence of plutonium release into the environment from the Fukushima DNPP accident / Zheng Jian, Tagami Keiko, Watanabe Yoshito, Uchida Shigeo, Aono Tatsuo, Ishii Nobuyoshi, Yoshida Satoshi, Kubota Yoshihisa, Fuma Shoichi, Ihara Sadao. Scientific Reports. – 2012. – V. 2. DOI: 10.1038/srep00304.
17. Yoshida N., Takahashi Y. Land-surface contamination by radionuclides from the Fukushima Daiichi nuclear power plant accident // Elements. – 2012. – V. 8. – P. 201–206.
18. Depth distribution of cesium-137 in paddy field across the Fukushima pollution plume in 2013 / H. Lapage, O. Evlard, Y. Onda, I. Lefevre, J.P. Lacey, S. Avrault // Journal of Environmental Radioactivity. – 2015. – V. 147. – P. 157–164.

19. Radiocesium transfer from hillslopes to the Pacific Ocean after the Fukushima Nuclear Power Plant accident: a review / O. Evrard, J.P. Lacey, H. Lepage, Y. Onda, O. Gerdan, S. Ayrault // *Journal of Environmental Radioactivity*. – 2015. – V. 148. – P. 92–110.
20. Zubekhina B.Y., Burakov B.E. Leaching of actinides and other radionuclides from matrices of Chernobyl «lava» as analogues of vitrified HLW // *Journal of Chemical Thermodynamics*. – 2017. – V. 114. – P. 25–29.
21. Behavior of radioactive cesium during incineration of radioactively contaminated wastes from decontamination activities in Fukushima / H. Fujiwara, H. Kuramochi, K. Nomura, T. Maeseto, M. Osako // *Journal of Environmental Radioactivity*. – 2015. – V. 178–179. – P. 290–296.
22. Wu J. Impacts of Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident on the Western North Pacific and the China Seas: evaluation based on field observation of ^{137}Cs // *Marine Pollution Bulletin*. – 2018. – V. 127. – P. 45–53.
23. Исследование радиоактивного загрязнения морской биоты в связи с аварией на АЭС «Фукусима-1» / В.П. Рамзаев, С.А. Иванов, Ю.Н. Гончарова, Н.М. Вишнякова, А.В. Севастьянов // *Радиационная гигиена*. – 2012. – Т. 4. – № 4. – С. 5–11.
24. Интерактивная карта мира // Google. URL: <https://www.google.ru/maps/search/Fukushima+NPP/@37.421553,141.0304366,988m/data=!3m1!1e3> (дата обращения 20.12.2020).
25. Current status of Fukushima Daiichi NPS. Efforts for Decommissioning and Contaminated Water Control, 2015. Available at: <http://www.mofa.go.jp/files/000069784.pdf> (дата обращения 29.11.2019).
26. Бутенко А.И. Нарушение уровней и барьеров глубоко-эшелонированной защиты на АЭС Фукусима // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. – 2012. – Т. 2/8. – № 56. – С. 46–51.
27. Experimental simulation of the radionuclide behaviour in the process of creating additional safety barriers in solid radioactive waste repositories containing irradiated graphite / A.O. Pavliuk, S.G. Kotlyarevskiy, E.V. Bespala, E.V. Zakarova, N.I. Rodygina, V.M. Ermolaev, I.M. Proshin, A.G. Volkova // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. – 2016. – № 142. – P. 1–7.
28. Сорбционные характеристики апатита и вермикулита по отношению к радионуклидам цезия и стронция / А.А. Кондрашова, Н.Д. Андрущенко, Е.В. Захарова, Е.А. Тюпина // *Успехи в химии и химической технологии*. – 2016. – Т. 30. – № 6 (175). – С. 56–58.
29. Investigation and modeling of cesium(I) adsorption by Turkish clays: bentonite, zeolite, sepiolite, and kaolinite / S. Bayulken, E. Bascetin, K. Guclu, R. Apak // *Environmental Progress & Sustainable Energy*. – 2011. – V. 30. – № 1. – P. 70–80.
30. Yoshikawa E., Komine H., Goto S. Evaluation on hydraulic conductivity of heavy bentonite-based slurry for using on decommissioning of the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station // *ICEG 2018: Proc. of the 8th International Congress on Environmental Geotechnics*. – 2018. – V. 3. – P. 105–112. DOI: 10.1007/978-981-13-2227-3_13.
31. The quantitative evaluation for radiation shielding capabilities of soil materials / E. Yoshikawa, H. Komine, S. Goto, M. Yoshimura, A. Suzuki, S. Narushima, Y. Arai, S. Ukiie, Y. Sakoda, Y. Nagae // *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. C (Geosphere Engineering)*. – 2017. – V. 73 (4). – P. 342–354. DOI: 10.2208/jscejge.73.342
32. Summary of recommendations of Nomenclature Committees relevant to clay mineralogy: Report of the Association Internationale Pour L'etude des Argiles (AIPEA) nomenclature committee for 2006 / S. Guggenheim, J.M. Adams, D.C. Bain, F. Bergaya, M.F. Bergaya, M. Brigatti, V.A. Drits, M.L.L. Formoso, E. Galan, T. Kogure, H. Stanjek // *Clays and Clay Minerals*. – 2006. – V. 54. – № 6. – P. 761–772. DOI: 10.1180/0009855064140225.
33. Применение природных глинистых материалов для повышения уровня ядерной и радиационной безопасности объектов ядерного наследия / В.В. Крупская, Д.В. Бирюков, П.Е. Белосусов, В.А. Лехов, А.Ю. Романчук, С.Н. Калмыков // *Радиоактивные отходы*. – 2018. – № 2 (3). – С. 30–43.
34. Crystallography open database (COD): an open-access collection of crystal structures and platform for world-wide collaboration / S. Grazulis, A. Daskevicius, A. Merkys, D. Chateigner, L. Lutterotti, M. Quiro's, N.R. Serebryanaya, P. Moeck, R.T. Downs, A. Le Bail // *Nucleic Acids Research*. – 2012. – V. 40. – P. 420–427. DOI: 10.1093/nar/gkr900.
35. Experience of on-site disposal of production uranium-graphite nuclear reactor / A.O. Pavliuk, S.G. Kotlyarevskiy, E.V. Bespala, E.V. Zakharova, V.M. Ermolaev, A.G. Volkova // *Journal of Environmental Radioactivity*. – 2018. – V. 184–185. – P. 22–31.
36. Izmetiev A., Pavliuk A., Kotlyarevsky S. Application of void-free filling technology for additional safety barriers creation during uranium-graphite reactors decommissioning // *Advanced Materials Research*. – 2015. – V. 1084. – P. 613–619.
37. Чубреев Д.О., Кузнецов Г.В. Использование глинистых материалов для создания барьера безопасности выводимого из эксплуатации реактора АД // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2016. – Т. 327. – № 2. – С. 83–87.
38. Антоненко М.В., Чубреев Д.О., Кузнецов Г.В. Моделирование процесса диффузии радиоуглерода из активной зоны выводимого из эксплуатации ПУТР АД // *Атомная энергия*. – 2015. – Т. 118. – С. 63–68.
39. Mokrov Yu.G., Mokrov K.Yu. Modeling of atmospheric transfer of radionuclides in the form of water aerosols from the surface area of water bodies using the example of Lake Karachay, Russia // *Radiation and Environmental Biophysics*. – 2019. – V. 58. – P. 393–405. DOI: 10.1007/s00411-019-00799-w.
40. Мокров Ю.Г., Алексахин А.И. Мониторинг – основа обеспечения безопасности при выполнении работ по консервации водоёма Карачай // *Радиоактивные отходы*. – 2018. – № 3 (4). – С. 60–68.
41. Взаимодействие U, Np и Pu с коллоидными частицами SiO_2 / Д.Н. Батук, А.А. Ширяев, С.Н. Калмыков, Е.В. Захарова, Ю.А. Тетерин, О.Н. Батук, Б.Ф. Мясоедов // *Радиохимия*. – 2012. – Т. 54. – № 6. – С. 522–526.
42. Analysis of ^{134}Cs and ^{137}Cs distribution in soil of Fukushima prefecture and their specific adsorption on clay minerals / A. Maekawa, N. Momoshima, S. Sugihara, R. Ohzawa, A. Nakama // *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. – 2015. – V. 303. – P. 1485–1489.
43. Сорбционные характеристики материалов фильтрационного барьера в верхних водоносных горизонтах, загрязненных радионуклидами / Н.Д. Андрущенко, А.В. Сафонов, Т.Л. Бабич, П.В. Иванов, Ю.В. Коневник, А.А. Кондрашова, И.М. Прошин, Е.В. Захарова // *Радиохимия*. – 2017. – Т. 59. – № 4. – С. 361–370.
44. Behavior of Cs, Np(V), Pu(IV), and U(VI) in pore water of Bentonite / M.N. Sabodina, S.N. Kalmykov, K.A. Artem'eva, E.V. Zakharova, Yu.A. Sapozhnikov // *Radiochemistry*. – 2006. – V. 48. – № 5. – P. 488–492.
45. Sorption of plutonium on geological materials associated with a Chinese radioactive waste repository: influence of pH / Ya. Leng, M.J. Henderson, J. Courtois, H. Li, K. Xiong, X. Tuo, M. Yan // *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. – 2016. – V. 308. – P. 895–903.
46. Natural attenuation of Fukushima-derived radiocesium in soils due to its vertical and lateral migration / A. Konoplev, V. Golosov, Y. Wakiyama, T. Takase, V. Yoschenko, T. Yoshihara, O. Parenjuk, A. Cresswell, M. Ivanov, M. Carradine, K. Nanba, Y. Onda // *Journal of Environmental Radioactivity*. – 2018. – V. 186. – P. 23–33.
47. Source dynamics of radiocesium-contaminated particulate matter deposited in an agricultural water reservoir after the Fukushima nuclear accident / S. Houn, S. Hayashi, J.P. Lacey, H. Tsuji, Y. Onda, O. Evrard // *Science of the Total Environment*. – 2018. – V. 612. – P. 1079–1090.
48. Мироненко В.А., Румынин В.Г. Проблемы гидрогеоэкологии. Монография в 3-х томах. Т. 1. Теоретическое изучение и моделирование геомиграционных процессов. – М.: Изд-во Московского государственного горного университета, 1998. – 611 с.
49. Shackelford C.D., Moore S.M. Fickian diffusion of radionuclides for engineered containment barriers: diffusion coefficients, porosities, and complicating issues // *Engineering Geology*. – 2013. – V. 152. – P. 133–147.
50. Study on the leaching behavior of actinides from nuclear fuel debris / A. Kirishima, M. Hirano, D. Akiyama, T. Sasaki, N. Sato // *Journal of Nuclear Materials*. – 2018. – V. 502. – P. 169–176.

51. Artificial radioactivity in environmental media (air, rainwater, soil, vegetation) in Austria after the Fukushima nuclear accident / G. Steinhäuser, S. Merz, D. Hainz, J.H. Sterba // *Environmental Science and Pollution Research*. – 2013. – V. 20. – № 4. – P. 2527–2537.
52. Van Loon L.R., Mibus J. A modified version of Archie's law to estimate effective diffusion coefficients of radionuclides in argillaceous rocks and its application in safety analysis studies // *Applied Geochemistry*. – 2015. – V. 59. – P. 85–94.
53. Кудряшов Н.А., Серебрякова И.Е. Математическое моделирование миграции долгоживущих радионуклидов в почве в результате радиоактивных выпадений // *Атомная энергия*. – 1993. – Т. 74. – С. 243–247.
54. Моделирование процесса миграции долгоживущих радионуклидов из графитовых радиоактивных отходов / А.О. Павлюк, С.Г. Котляревский, Е.В. Беспала, А.Г. Волкова, Е.В. Захарова, Н.Д. Андрущенко // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2017. – Т. 328. – № 4. – С. 75–84.
55. Film and intraparticle mass transfer during the adsorption of metal ions onto bone char / K.K.H. Choy, D.C.K. Ko, C.W. Cheung, J.F. Porter, G. McKay // *Journal of Colloid and Interface Science*. – 2004. – V. 271. – P. 284–295. DOI: 10.1016/j.jcis.2003.12.015.
56. Experimental validation of retardation of tritium migration in the Chinese Loess Media / R. Zuo, Ya. Teng, J. Wang, Q. Hu, M. Guo // *Water Air and Soil Pollution*. – 2011. – V. 215. – P. 497–506. DOI: 10.1007/s11270-010-0494-x.
57. Сорбционная способность природного и модифицированного монтмориллонита по отношению к ионам меди в присутствии органических кислот / Е.Д. Дмитриева, А.А. Горячева, К.В. Сюндюкова, Е.Н. Музафаров // *Сорбционные и хроматографические процессы*. – 2016. – Т. 16. – № 6. – С. 813–820. URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_27448864_32439248.pdf (дата обращения 15.06.2021).
58. Использование электроосмотического эффекта для осушения барьеров безопасности при выводе из эксплуатации ядерно- и радиационно опасных объектов / М.В. Антоненко, А.В. Леонов, Е.В. Беспала, Д.О. Чубреев, Ю.Р. Беспала // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2019. – Т. 330. – № 7. – С. 130–139.
59. Wilson M.J. The origin and formation of clay minerals in soils: past, present and future perspectives // *Clay Minerals*. – 1999. – V. 34. – P. 7–25. DOI: 10.1180/000985599545957.
60. Zaunbrecher L.K., Cygan R.T., Elliott W.C. Molecular simulation of cesium and rubidium adsorption on weathered micaceous minerals // *The Journal of Physical Chemistry: A*. – 2015. – V. 119. – P. 5691–5700. DOI: 10.1021/jp512824k.
61. Tritium and radiocarbon in the western North Pacific waters: post-Fukushima situation / J. Kaizer, M. Aoyama, Yu. Kumamoto, M. Molnar, L. Palcsu, P.P. Povinec // *Journal of Environmental Radioactivity*. – 2018. – V. 184–185. – P. 83–94.
62. Impact of the Fukushima accident on tritium, radiocarbon and radiocesium levels in seawater of the western North Pacific Ocean: a comparison with pre-Fukushima situation / P.P. Povinec, L. Liang Wee Kwong, J. Kaizer, M. Molnar, M. Hies, L. Palcsu, L. Papp, M.K. Pham, P. Jean-Baptiste // *Journal of Environmental Radioactivity*. – 2017. – V. 166. – P. 56–66.
63. Song J.H. An assessment on the environmental contamination caused by the Fukushima accident // *Journal of Environmental Management*. – 2018. – V. 206. – P. 846–852.
64. Техничко-экономические характеристики технологий очистки воды от трития методом химического изотопного обмена в системе вода–водород / А.И. Костылев, И.С. Ледовской, Э.П. Магомедбеков, М.Б. Розенкевич, Ю.А. Сахаровский, И.Л. Селиваненко, А.И. Соболев, С.Н. Флора // *Радиохимия*. – 2014. – Т. 56. – № 5. – С. 450–454.
65. Использование раствора кремниевой кислоты для создания противодиффузионной завесы в песчаном горизонте / Е.П. Каймин, Е.В. Захарова, Л.И. Константинова, А.А. Зубков, В.В. Данилов // *Геозкология, инженерная геология, гидрогеология, геокриология*. – 2007. – № 2. – С. 137–142.

Поступила 23.06.2021 г.

Информация об авторах

- Антоненко М.В.**, кандидат технических наук, заместитель главного инженера, Горно-химический комбинат.
- Беспала Е.В.**, кандидат физико-математических наук, начальник отдела научно-исследовательской деятельности и технологического сопровождения вывода из эксплуатации, Горно-химический комбинат.
- Мышкин В.Ф.**, доктор физико-математических наук, профессор отделения ядерного топливного цикла инженерной школы ядерных технологий, Национальный исследовательский Томский политехнический университет.
- Павлюк А.О.**, кандидат физико-математических наук, руководитель группы Научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, АО «Опытно-демонстрационный центр вывода из эксплуатации уран-графитовых ядерных реакторов».
- Котляревский С.Г.**, ведущий инженер группы Научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ АО «Опытно-демонстрационный центр вывода из эксплуатации уран-графитовых ядерных реакторов».
- Захарова Е.В.**, кандидат химических наук, заведующая лабораторией экологических проблем обращения с радиоактивными и токсичными отходами Института физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина Российской академии наук.
- Волкова А.Г.**, кандидат химических наук, научный сотрудник лаборатории экологических проблем обращения с радиоактивными и токсичными отходами Института физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина Российской академии наук.
- Беспала Ю.Р.**, аспирант отделения ядерного топливного цикла инженерной школы ядерных технологий, Национальный исследовательский Томский политехнический университет; инженер, Горно-химический комбинат.

UDC 631.438.2; 544.034.24; 532.5-1/-9

POSSIBILITY OF USING CLAY-BASED BARRIER MATERIALS FOR LOCALIZING THE CONSEQUENCES OF RADIATIONS ACCIDENTS (FOR EXAMPLE, THE FUKUSHIMA DAIICHI NPP)

Mikhail V. Antonenko¹,
antonenkommv26@mail.ru

Evgeny V. Bespala¹,
bespala_evgeny@mail.ru

Vyacheslav F. Myshkin²,
gos100@tpu.ru

Alexander O. Pavlyuk³,
seversknet@rambler.ru

Sergey G. Kotlyarevskiy³,
skotkyarevkiy@rambler.ru

Elena V. Zakharova⁴,
zevchem@rambler.ru

Anna G. Volkova⁴,
anna.agv@yandex.ru

Yuliya R. Bespala^{2,1},
yrbespala@gmail.com

¹ Mining and Chemical Combine,
53, Lenin street, Zheleznogorsk, 662972, Russia.

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

³ Pilot and Demonstration Center for Uranium-Graphite Nuclear Reactor Decommissioning,
179a, Avtodoroga 13 street, Seversk, 636000, Russia.

⁴ A.N. Frumkin Institute of Physical chemistry and Electrochemistry RAS,
31, Leninskiy avenue, Moscow, 119071, Russia.

The relevance of the research topic is caused by the need to develop new innovative barrier materials with anti-filtration and anti-migratory properties to localize the consequences of the disaster at the Fukushima Daiichi NPP.

The main aim of the study is the review of the possibility of using domestic technologies for localization of radionuclides inside the points of placement of radioactive waste and nuclear materials (corium) to solve the problem of migration of radionuclides at the Fukushima-Daiichi NPP.

Methods: mathematical modeling of radionuclides migration from the active zone of the destroyed power units of the Fukushima Daiichi NPP through clay-containing safety barriers.

The results. The paper presents the results of consideration of possibility of using barrier materials for localizing the consequences of radiations accidents. Using the safety clay-based barriers and gelling solutions to prevent the underground migration of radionuclides from destroyed power units to environment was suggested according to positive domestic experience. Accident on nuclear power plant Fukushima-1, occurred on 11 March 2011, was chosen as an example of such a situation. Currently this object is the area for working out the technology and approaches to eliminate the radiation accidents. It was shown that the inflow of radioactive contamination into the ocean is caused by groundwater, rainwater and cooling water, which is daily pumped into the damaged core. Disadvantages of the system used by the safety barrier based on ground frosts were described. On the basis of positive domestic experience, the use of clay-containing safety barriers was proposed to prevent migration of radionuclides from destroyed power units to the ocean. Clay-content materials based on vermiculite, perlite, zeolite, schungite and their sorption characteristics were determined for these purposes. The results of modeling the migration of the most active radionuclides (Pu, Cs, Sr, U) through the described barrier materials were presented. The possibility of using the safety barrier based on a mixture of clays was shown. The width of such a barrier does not exceed 3,7 m (determined by the rate of migration of uranium). The total volume of clay-based material barrier required to prevent migration of radionuclides is ~145900 m³.

Key words:

Fukushima Daiichi NPP, accident, safety barriers, clay, migration, radionuclide.

REFERENCES

1. Bolshov L.A. *Avariya na AES «Fukushima-1»: Opyt reagirovaniya i uroki* [Accident at Fukushima-1 NPP: response and lessons learned]. Moscow, Nauka Publ., 2013. 246 p.
2. Aron D.V., Pavlova M.V., Panchenko S.V. Estimates of the scale of the social and economic consequences of the accident at the nuclear power plant in Fukushima Prefecture. *Proceedings of the Academy of Sciences. Power engineering*, 2013, no. 5, pp. 65–71. In. Rus.
3. Brumfiel G. Fukushima: fallout of fear. *Nature*, 2013, vol. 493, no. 7432, pp. 290–293.
4. Fujii Y., Satake K., Sakai S., Shinohara M., Kanazawa T. Tsunami source of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake. *Earth, Planets and Space*, 2011, vol. 63, no. 7, pp. 815–820.
5. Tong L.L. Hydrogen risk for advanced PWR under typical severe accidents induced by DVI line break. *Annals of Nuclear Energy*, 2016, vol. 94, pp. 325–331.
6. Wang D., Cao X. Preliminary analysis of hydrogen distribution during severe accident induced by loss of coolant accident. *International Conference on Nuclear Engineering, Proceedings, ICONE*, 2017, vol. 8. DOI: 10.1115/ICONE25-66497.
7. Tanabe F. Analyses of core melt and re-melt in the Fukushima Daiichi nuclear reactors. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 2012, vol. 49, no. 1, pp. 18–36.
8. Steinhäuser G., Brandl A., Johnson T.E. Comparison of the Chernobyl and Fukushima nuclear accidents: a review of the environmental impacts. *Science of the Total Environment*, 2014, vol. 470–471, pp. 800–817.

9. Ahlswede J., Hebel S., Ross J.O., Schoetter R., Kalinowski M.B. Update and improvement of the global krypton-85 inventory. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2013, vol. 115, pp. 34–42.
10. Stohl A., Seibert P., Wotawa G. The total release of xenon-133 from the Fukushima Dai-ichi nuclear power plant accident. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2012, vol. 112, pp. 155–159.
11. Ten Hoeve J.E., Jacobson M.Z. Worldwide health effects of the Fukushima Daiichi nuclear accident. *Energy and Environmental Science*, 2012, no. 5, pp. 8743–8757.
12. Winiarek V., Bocquet M., Saunier O., Mathieu A. Estimation of errors in the inverse modeling of accidental release of atmospheric pollutant: application to the reconstruction of the cesium-137 and iodine-131 source terms from the Fukushima Daiichi power plant. *Journal of Geophysical Research: Atmosphere*, 2012, vol. 117, pp. 1–16. DOI: 10.1029/2011JD016932.
13. Hamada N., Ogino H. Food safety regulations: what we learned from the Fukushima nuclear accident. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2012, vol. 111, pp. 83–99.
14. Chino M., Nakayama H., Nagai H., Terada H., Katata G., Yamazawa H. Preliminary estimation of release amounts of ¹³¹I and ¹³⁷Cs accidentally discharged from the Fukushima Daiichi nuclear power plant into the atmosphere. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 2011, vol. 48, no. 7, pp. 1129–1134.
15. Stohl A., Seibert P., Wotawa G., Arnold D., Burkhar J.F., Eckhardt S. Xenon-133 and caesium-137 releases into the atmosphere from the Fukushima Dai-ichi nuclear power plant: determination of the source term, atmospheric dispersion, and deposition. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2011, vol. 11, pp. 28319–28394.
16. Zheng Jian, Tagami Keiko, Watanabe Yoshito, Uchida Shigeo, Aono Tatsuo, Ishii Nobuyoshi, Yoshida Satoshi, Kubota Yoshihisa, Fuma Shoichi, Ihara Sadao. Isotopic evidence of plutonium release into the environment from the Fukushima DNPP accident. *Scientific Reports*, 2012, vol. 2. DOI: 10.1038/srep00304.
17. Yoshida N., Takahashi Y. Land-surface contamination by radionuclides from the Fukushima Daiichi nuclear power plant accident. *Elements*, 2012, vol. 8, pp. 201–206.
18. Lapage H., Evlard O., Onda Y., Lefevre I., Lacey J.P., Avrault S. Depth distribution of cesium-137 in paddy field across the Fukushima pollution plume in 2013. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2015, vol. 147, pp. 157–164.
19. Evrard O., Lacey J.P., Lepage H., Onda Y., Gerdan O., Avrault S. Radiocesium transfer from hillslopes to the Pacific Ocean after the Fukushima Nuclear Power Plant accident: a review. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2015, vol. 148, pp. 92–110.
20. Zubekhina B.Y., Burakov B.E. Leaching of actinides and other radionuclides from matrices of Chernobyl “lava” as analogues of vitrified HLW. *Journal of Chemical Thermodynamics*, 2017, vol. 114, pp. 25–29.
21. Fujiwara H., Kuramochi H., Nomura K., Maeseto T., Osako M. Behavior of radioactive cesium during incineration of radioactively contaminated wastes from decontamination activities in Fukushima. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2015, vol. 178–179, pp. 290–296.
22. Wu J. Impacts of Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident on the Western North Pacific and the China Seas: evaluation based on field observation of ¹³⁷Cs. *Marine Pollution Bulletin*, 2018, vol. 127, pp. 45–53.
23. Ramzaev V.P., Ivanov S.A., Goncharova Yu.N., Vishnyakova N.M., Sevastyanov A.V. Investigation of radioactive contamination of marine biota in connection with the accident at the Fukushima-1 NPP. *Radiation hygiene*, 2012, vol. 4, no. 4, pp. 5–11. In Rus.
24. Interactive world map. Google. Available at: <https://www.google.ru/maps/search/Fukushima+NPP/@37.421553,141.030436,6.9888m/data=!3m1!1e3> (accessed 20 December 2020).
25. Current status of Fukushima Daiichi NPS. *Efforts for Decommissioning and Contaminated Water Control*, 2015. Available at: <http://www.mofa.go.jp/files/000069784.pdf> (accessed 29 November 2019).
26. Butenko A.I. Violation of levels and barriers of deep-level protection at the Fukushima nuclear power plant. *Eastern European Journal of Advanced Technology*, 2012, vol. 2/8, no. 56, pp. 46–51. In Rus.
27. Pavliuk A.O., Kotlyarevskiy S.G., Bepala E.V., Zakarova E.V., Rodygina N.I., Ermolaev V.M., Proshin I.M., Volkova A.G. Experimental simulation of the radionuclide behaviour in the process of creating additional safety barriers in solid radioactive waste repositories containing irradiated graphite. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2016, no. 142, pp. 1–7.
28. Kondrashova A.A., Andryushchenko N.D., Zakharova E.V., Tyupina E.A. Sorption characteristics of apatite and vermiculite in relation to cesium and strontium radionuclides. *Successes in chemistry and chemical technology*, 2016, vol. 30, no. 6(175), pp. 56–58. In Rus.
29. Bayulken S., Bascetin E., Guclu K., Apak R. Investigation and modeling of cesium(I) adsorption by Turkish clays: bentonite, zeolite, sepiolite, and kaolinite. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 2011, vol. 30, no. 1, pp. 70–80.
30. Yoshikawa E., Komine H., Goto S. Evaluation on hydraulic conductivity of heavy bentonite-based slurry for using on decommissioning of the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station. *ICEG 2018: Proceedings of the 8th International Congress on Environmental Geotechnics*, 2018, vol. 3, pp. 105–112. DOI: 10.1007/978-981-13-2227-3_13.
31. Yoshikawa E., Komine H., Goto S., Yoshimura M., Suzuki A., Narushima S., Arai Y., Ukiie S., Sakoda Y., Nagae Y. The quantitative evaluation for radiation shielding capabilities of soil materials. *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. C (Geosphere Engineering)*, 2017, vol. 73 (4), pp. 342–354. DOI: 10.2208/jscejge.73.342
32. Guggenheim S., Adams J.M., Bain D.C., Bergaya F., Bergaya M.F., Brigatti M., Drits V.A., Formoso M.L.L., Galan E., Kogure T., Stanjek H. Summary of recommendations of Nomenclature Committees relevant to clay mineralogy: report of the Association Internationale Pour L’etude des Argiles (AIPEA) nomenclature committee for 2006. *Clays and Clay Minerals*, 2006, vol. 54, no. 6, pp. 761–772. DOI: 10.1180/0009855064140225.
33. Krupskaya V.V., Biryukov D.V., Belousov P.E., Lehov V.A., Romanchuk A.Yu., Kalmykov S.N. Use of Natural Clay Materials to Increase Nuclear and Radiation Safety of Nuclear Legacy Facilities. *Radioactive Waste*, 2018, no. 2 (3), pp. 30–43. In Rus.
34. Grazulis S., Daskevicius A., Merkys A., Chateigner D., Lutterotti L., Quiro’s M., Serebryanaya N.R., Moeck P., Downs R.T., Le Bail A. Crystallography open database (COD): an open-access collection of crystal structures and platform for world-wide collaboration. *Nucleic Acids Research*, 2012, vol. 40, pp. 420–427. DOI: 10.1093/nar/gkr900.
35. Pavliuk A.O., Kotlyarevskiy S.G., Bepala E.V., Zakharova E.V., Ermolaev V.M., Volkova A.G. Experience of on-site disposal of production uranium-graphite nuclear reactor. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2018, vol. 184–185, pp. 22–31.
36. Izmetiev A., Pavliuk A., Kotlyarevskiy S. Application of void-free filling technology for additional safety barriers creation during uranium-graphite reactors decommissioning. *Advanced Materials Research*, 2015, vol. 1084, pp. 613–619.
37. Chubreev D.O., Kuznetsov G.V. Using clay materials for developing safety barrier of decommissioning AD reactor. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2016, vol. 327, no. 2, pp. 83–87. In Rus.
38. Antonenko M.V., Chubreev D.O., Kuznetsov G.V. Modeling of radionuclide diffusion from the active zone of the decommissioned PUGP AD. *Atomic Energy*, 2015, vol. 118, pp. 63–68. In Rus.
39. Mokrov Yu.G., Mokrov K.Yu. Modeling of atmospheric transfer of radionuclides in the form of water aerosols from the surface area of water bodies using the example of Lake Karachay, Russia. *Radiation and Environmental Biophysics*, 2019, vol. 58, pp. 393–405. DOI: 10.1007/s00411-019-00799-w.
40. Mokrov Yu.G., Aleksahin A.I. Monitoring is safety basis for the conservation of the Karachay reservoir. *Radioactive waste*, 2018, no. 3 (4), pp. 60–68. In Rus.
41. Batuk D.N., Shiryav A.A., Kalmykov S.N., Zakharova E.V., Teterin Yu.A., Batuk O.N. Interaction U, Np and Pu with colloidal particles SiO₂. *Radiochemistry*, 2012, vol. 54, no. 6, pp. 522–526.
42. Maekawa A., Momoshima N., Sugihara S., Ohzawa R., Nakama A. Analysis of ¹³⁴Cs and ¹³⁷Cs distribution in soil of Fukushima prefecture and their specific adsorption on clay minerals. *Journal of Radio-analytical and Nuclear Chemistry*, 2015, vol. 303, pp. 1485–1489.
43. Andryushchenko N.D., Safonov A.V., Babich T.L., Ivanov P.V., Konevnik Yu.V., Kondrashova A.A., Proshin I.M., Zakharova E.V. Sorption characteristics of the materials of the filtration barrier in

- the upper aquifers contaminated with radionuclides. *Radiochemistry*, 2017, vol. 59, no. 4, pp. 361–370. In Rus.
44. Sabodina M.N., Kalmykov S.N., Artem'eva K.A., Zakharova E.V., Sapozhnikov Yu.A. Behavior of Cs, Np(V), Pu(IV), and U(VI) in pore water of Bentonite. *Radiochemistry*, 2006, vol. 48, no. 5, pp. 488–492.
 45. Leng Ya., Henderson M.J., Courtois J., Li H., Xiong K., Tuo X., Yan M. Sorption of plutonium on geological materials associated with a Chinese radioactive waste repository: influence of pH. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2016, vol. 308, pp. 895–903.
 46. Konoplev A., Golosov V., Wakiyama Y., Takase T., Yoschenko V., Yoshihara T., Parenjuk O., Cresswell A., Ivanov M., Carradine M., Nanba K., Onda Y. Natural attenuation of Fukushima-derived radionuclides in soils due to its vertical and lateral migration. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2018, vol. 186, pp. 23–33.
 47. Houn S., Hayashi S., Lacey J.P., Tsuji H., Onda Y., Evrard O. Source dynamics of radionuclides-contaminated particulate matter deposited in an agricultural water reservoir after the Fukushima nuclear accident. *Science of the Total Environment*, 2018, vol. 612, pp. 1079–1090.
 48. Mironenko V.A., Rumynin V.G. *Problemy gidrogeologii. Monografiya v 3-kh tomakh. T. 1. Teoreticheskoe izuchenie i modelirovaniye geomigratsionnykh protsessov* [Problems of hydrogeology. Monograph in 3 vol. Vol. 1. Theoretical study and modeling of geomigration processes]. Moscow, Moscow State Mining University Publ., 1998. 611 p.
 49. Shackelford C.D., Moore S.M. Fickian diffusion of radionuclides for engineered containment barriers: Diffusion coefficients, porosities, and complicating issues. *Engineering Geology*, 2013, vol. 152, pp. 133–147.
 50. Kirishima A., Hirano M., Akiyama D., Sasaki T., Sato N. Study on the leaching behavior of actinides from nuclear fuel debris. *Journal of Nuclear Materials*, 2018, vol. 502, pp. 169–176.
 51. Steinhäuser G., Merz S., Hainz D., Sterba J.H. Artificial radioactivity in environmental media (air, rainwater, soil, vegetation) in Austria after the Fukushima nuclear accident. *Environmental Science and Pollution Research*, 2013, vol. 20, no. 4, pp. 2527–2537.
 52. Van Loon L.R., Mibus J. A modified version of Archie's law to estimate effective diffusion coefficients of radionuclides in argillaceous rocks and its application in safety analysis studies. *Applied Geochemistry*, 2015, vol. 59, pp. 85–94.
 53. Kudryashov N.A., Serebryakova I.E. Mathematical modeling of migration of long-lived radionuclides in soil as a result of radioactive fallout. *Atomic Energy*, 1993, vol. 74, pp. 243–247. In Rus.
 54. Pavlyuk A.O., Kotlyarevskiy S.G., Besspala E.V., Volkova A.G., Zakharova E.V., Andryushchenko N.D. Modelling migration process of long-lived radionuclides from graphite radioactive waste. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 4, pp. 75–84. In Rus.
 55. Choy K.K.H., Ko D.C.K., Cheung C.W., Porter J.F., McKay G. Film and intraparticle mass transfer during the adsorption of metal ions onto bone char. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2004, vol. 271, pp. 284–295. DOI: 10.1016/j.jcis.2003.12.015.
 56. Zuo R., Teng Ya., Wang J., Hu Q., Guo M. Experimental validation of retardation of tritium migration in the Chinese Loess Media. *Water Air and Soil Pollution*, 2011, vol. 215, pp. 497–506. DOI: 10.1007/s11270-010-0494-x.
 57. Dmitriyeva E.D., Goryacheva A.A., Syundyukova K.V., Muzafarov E.N. Sorption capacity of natural and modified montmorillonite with respect to copper ions in the presence of organic acids. *Sorbtsionnye i khromatograficheskie protsessy*, 2016, vol. 6, no. 6, pp. 813–820. In Rus.
 58. Antonenko M.V., Leonov A.V., Besspala E.V., Chubreev D.O., Besspala Yu.R. Application of electroosmotic effect for unwatering barriers during decommissioning nuclear legacy. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 7, pp. 130–139. In Rus.
 59. Kaizer J., Aoyama M., Kumamoto Yu., Molnar M., Palcsu L., Povinec P.P. Tritium and radiocarbon in the western North Pacific waters: post-Fukushima situation. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2018, vol. 184–185, pp. 83–94.
 60. Wilson M.J. The origin and formation of clay minerals in soils: past, present and future perspectives. *Clay Minerals*, 1999, vol. 34, pp. 7–25. DOI: 10.1180/000985599545957.
 61. Zaunbrecher L.K., Cygan R.T., Elliott W.C. Molecular Simulation of Cesium and Rubidium Adsorption on Weathered Micaceous Minerals. *The Journal of Physical Chemistry: A*, 2015, vol. 119, pp. 5691–5700. DOI: 10.1021/jp512824k.
 62. Povinec P.P., Liong Wee Kwong L., Kaizer J., Molnar M., Hies M., Palcsu L., Papp L., Pham M.K., Jean-Baptiste P. Impact of the Fukushima accident on tritium, radiocarbon and radionuclides levels in seawater of the western North Pacific Ocean: a comparison with pre-Fukushima situation. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2017, vol. 166, pp. 56–66.
 63. Song J.H. An assessment on the environmental contamination caused by the Fukushima accident. *Journal of Environmental Management*, 2018, vol. 206, pp. 846–852.
 64. Kostylev A.I., Ledovskoy I.S., Magomedbekov E.P., Rozenkevich M.B., Saharovskiy Yu.A., Selivanenko I.L., Sobolev A.I., Florya S.N. Technical and economic characteristic of the technology of water purification from tritium by chemical isotope exchange in a water-solution system. *Radiochemistry*, 2014, vol. 56, no. 5, pp. 450–454.
 65. Kaimin E.P., Zakharova E.V., Konstantinova L.I., Zubkov A.A., Danilov V.V. Ispolzovanie rastvora kremnevoy kisloty dlya sozdaniya protivofiltratsionnoy zavesy v peschanom gorizonte [Use of a solution of silicic acid to create an anti-filtration curtain in the sand horizon]. *Geoecology, engineering geology, hydrogeology, geocryology*, 2007, no. 2, pp. 137–142.

Received: 23 June 2021.

Information about the authors

Mikhail V. Antonenko, Cand. Sc., deputy chief engineer, Mining and Chemical Combine.

Evgeny V. Besspala, Cand. Sc., head of department, Mining and Chemical Combine.

Vyacheslav F. Myshkin, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Alexander O. Pavlyuk, Cand. Sc., head of the group, Pilot and Demonstration Center for Uranium-Graphite Nuclear Reactor Decommissioning.

Sergey G. Kotlyarevskiy, leading engineer, Pilot and Demonstration Center for Uranium-Graphite Nuclear Reactor Decommissioning.

Elena V. Zakharova, Cand. Sc., head of the laboratory, Russian academy of sciences A.N. Frumkin Institute of Physical chemistry and Electrochemistry RAS.

Anna G. Volkova, Cand. Sc., researcher, Russian academy of sciences A.N. Frumkin Institute of Physical chemistry and Electrochemistry RAS.

Yuliya R. Besspala, postgraduate student, National Research Tomsk Polytechnic University; engineer, Mining and Chemical Combine.

УДК 553.3/4:553.2:550.4

СИЕНИТЫ И МОНЦОНИТЫ СИЯ-УШПИНСКОГО МЕЖДУРЕЧЬЯ ГОРНОГО АЛТАЯ: АБСОЛЮТНЫЙ ВОЗРАСТ, ГЕОХИМИЯ И ПЕТРОЛОГИЯ

Гусев Анатолий Иванович¹,
anzerg@mail.ru

Табакаева Евгения Михайловна²,
tabakaevaem@mail.ru

¹ Алтайский государственный гуманитарно-педагогический университет им. В.М. Шукшина,
Россия, 659333, г. Бийск, ул. Владимира Короленко, 53.

² Алтайский государственный университет,
Россия, 656049, г. Барнаул, пр. Ленина, 61.

Актуальность выполненных исследований связана с необходимостью уточнения абсолютного возраста и изучения особенностей петрологии и геохимии умеренно-щелочных пород – сиенитов и монцонитов Сия-Ушпинского междуречья на северо-востоке Горного Алтая в России для определения закономерностей формирования, связанного с ними золотого оруденения. Проблема генезиса щелочных изверженных пород продолжает привлекать внимание ученых многих стран в связи с тем, что эти породы используются для подтверждения мантийно-корового взаимодействия и определения характера эволюции континентальной коры. Сегодня ещё нет единой позиции на их происхождение.

Цель: определить абсолютный возраст щелочных сиенитов Ульменского рудного поля, изучить петрологические и геохимические особенности сиенитоидов и монцонитов Сия-Ушпинского междуречья с использованием комплекса петрологических диаграмм, позволяющих выявлять физико-химические особенности петрогенезиса.

Главными объектами изучения были сиенитоиды и монцониты ульменского пироксенит-сиенит-монцонит-габбрового комплекса среднего кембрия, расположенные в Сия-Ушпинском междуречье. Данная территория приурочена к аномальному тектоническому блоку, сформировавшемуся на стыке горно-алтайских, горно-шорских и салаирских структур. Среди минералов объектами исследования являются цирконы из щелочных сиенитов Западного участка Ульменского рудного поля.

Методы. Определение абсолютного возраста пород выполнено U-Pb методом с помощью ионного микрозонда SHRIMP-II по циркону в Лаборатории ВСЕГЕИ (г. Санкт-Петербург). Геохимические данные интерпретировались с помощью комплекса петрологических диаграмм. Тетрад-эффект фракционирования РЗЭ ($TE_{1,3}$) рассчитан по методике В. Ирбер.

Результаты. Абсолютный возраст сиенитов Сия-Ушпинского междуречья составляет 501 ± 4 млн лет, что соответствует концу среднего кембрия. Получены данные о вещественном составе сиенитов и монцонитов района Большого Личима, Ушпы, Ульмени, Верхнего Каракана, Салазана в пределах Сия-Ушпинского междуречья. Установлена последовательность их образования с выделением трех фаз: 1 фаза – монцониты, 2 фаза – щелочные сиениты, 3 фаза – сиениты. Монцониты и сиениты относятся к породам среднего состава умереннощелочной серии. Помимо этого, состав изученных нами монцонитов и сиенитов соответствует шошонитовой серии. Высокие отношения Nb/Ta (от 19,0 до 31,4) и Zr/Hf (от 30,4 до 60,6) в сиенитоидах и монцонитах Сия-Ушпинского междуречья свидетельствуют о вовлечении в плавление материала нижней коры. Относительно низкие концентрации Ni (от 2,3 до 4,1 г/т), Cr (от 1,0 до 3,2 г/т) и MgO (от 0,27 до 1,39 %) в сиенитах и монцонитах указывают на то, что они не могли быть продуктом прямого плавления мантийной магмы и результатом фракционирования мафических минералов из эволюционированного расплава. Следовательно, генерация сиенитов и монцонитов Сия-Ушпинского междуречья происходила по сценарию, в котором основная роль отводится расплавам, сформированным в результате частичного плавления материала нижней толще коры. На экспериментальных диаграммах, позволяющих реставрировать источник плавления для магматических пород, составы сиенитоидов и монцонитов Сия-Ушпинского междуречья попадают или близко тяготеют к полям плавления амфиболитов и граувакк. В изучаемых породах выявлен тетрад-эффект M-типа в спектре распределения редкоземельных элементов, что указывает на их насыщение флюидами, среди которых важная роль принадлежала CO_2 и H_2O . Последние имели ключевое значение для перемещения и концентрации золота. Авторская диаграмма Au – $TE_{1,3}$ показывает тренд повышения содержания золота при возрастании значений тетрад-эффекта M-типа в спектре распределения редкоземельных элементов. Пространственно с областью распространения сиенитов и монцонитов связаны многочисленные проявления золота, золотосодержащие россыпи, а также Ульменское золото-медно-скарновое месторождение. На последнем наиболее богатое оруденение тяготеет к дайкам сиенитов.

Ключевые слова:

Умеренно-щелочный магматизм, сиениты, монцониты, петрология, циркон, тетрад-эффект фракционирования редкоземельных элементов, золото, Горный Алтай.

Введение

Ненасыщенные кремнием плутонические комплексы являются одной из загадочных групп умеренно-щелочных пород. Происхождение калиевого магматизма обсуждается уже многие годы [1–5]. Его продукты встречаются в различных геодинамических обстановках. Главным образом щелочные изверженные породы тяготеют к тектоническим обстановкам

растяжения, таким как пост-орогенные, или внутримитные [6–8], плюмовые обстановки крупных изверженных провинций [9, 10], а также к районам субдукции [11, 12]. Пространственный анализ ГИС на основе глобальной геохимической базы данных GEOROC также подтверждает приуроченность кайнозойских щелочных пород к границам плит или к горячим точкам, связанным с мантией и плюмом [13]. Значимость

изучения продуктов калиевого магматизма определяется тем, что они используются для подтверждения мантийно-корового взаимодействия и характера эволюции континентальной коры [14–16].

Предложено несколько моделей происхождения щелочных пород и характера магматических процессов, которые включают: 1 – остаточные расплавы, образованные в результате фракционной кристаллизации щелочных базальтовых магм [16, 17]; 2 – расплавы, сформированные низкой степенью частичного плавления метасоматизированной мантии [5, 11, 14, 18–21]; 3 – расплавы, образовавшиеся благодаря частичному плавлению коровых материалов в условиях давлений, типичных для основания утолщённой земной коры в закрытой системе [22, 23], или в связи с притоком летучих компонентов [15, 24]; 4 – смесь коровой анатектической гранитной и мантийно-производной мафической магм, сопровождающаяся последующей кристалл-дифференциацией [1, 3, 25]. Однако согласие в объяснении процессов становления и генезиса калиевых магм так и не достигнуто [4, 26–28].

Как правило, сиениты и монцониты формируются в несколько стадий, образуя сложные комплексы и серии пород. Так, на территории Центральной Камчатки сформировалась калиевая вулканоплутоническая серия пород, которая варьируется от монцогаббро- и монцодиорита до монцонита и сиенит-порфира, за которой следует второй магматический цикл трахитовых сиенит-порфиров и, возможно, других более дифференцированных монцонитовых фаз [20].

По особенностям химического состава сиенитоиды близки к шошонитовой серии [20]. Более высокое содержание K, LILE и несовместимых элементов в шошонитовых магмах по сравнению с известково-щелочными обусловлено более низкой степенью плавления [12]. Для высококалиевых магматических пород, переходных к шошонитам, характерны высокие средние значения K_2O/Na_2O и высокие средние отношения Ce/Yb [19].

Металлогенический профиль сиенитоидов преимущественно золоторудный. Пространственно и парагенетически с сиенитами связано золото-сульфидно-кварцевое, золото-джаспероидное оруденение в Юхтино-Пуриканской рудной зоне Якутии (месторождения Самолазовское, Гарбузовское, Томмотское и проявление Аномальное) [29]. Кроме того, со щелочными комплексами связаны порфировые Cu-Au системы – месторождения Рябиновое (Алдан) [30], Кирганикское (Камчатка) [20, 30], крупнейшее месторождение меди Юлонг (Китай) [31] и многие другие золоторудные объекты, а также эпitherмальное золотое оруденение. Примером последнего является месторождение Ладолам на острове Лихир (Папуа-Новая Гвинея) – одно из крупнейших эпitherмальных месторождений золота, обнаруженных в настоящее время [19].

Отмечается важная роль летучих компонентов в контроле золотого оруденения. Так, в районе месторождения Ладолам установлено особенно высокое содержание хлора в слюдах (флогопите и биотите) – до 0,15 мас. %, а также высокое значение летучести

кислорода (fO_2) в щелочных породах. Предполагается, что комплексобразование хлоридов в значительной степени контролировало содержание Au и Cu в водных флюидах, ответственных за гидротермальную минерализацию золота в Ладоламе [19]. На основе результатов исследований крупнейшего в Китае месторождения золота Дунпин, связанного с интрузиями сиенитов, предлагается использование цирконов в качестве индикаторов источников флюидов и рудогенеза в многоступенчатой гидротермальной системе [32]. Месторождение Дунпин расположено на северной окраине Северо-Китайского кратона и сформировалось в результате двух этапов минерализации – среднедевонской (~380 млн лет) и раннемеловой (~140 млн лет). Девонские гидротермальные цирконы, извлеченные из золотоносных кварцевых жил, образовались в результате метасоматических изменений магматических цирконов под действием богатого фтором флюида, что позволяет предполагать его магматическую природу, наряду с автосоматическими процессами при кристаллизации сиенитов Шуйцюаньгоу, тогда как на меловом этапе золотой минерализации вовлекался флюид, выделившийся из щелочного плутона Шаншуйцюань. Золотая минерализация первой стадии характеризуется высоким содержанием золота (>10 г/т), для второй стадии свойственны более низкие содержания золота (<10 г/т) [33].

В Горном Алтае сиениты и монцониты, с которыми связаны грейзеновые проявления олова, встречаются в составе Бабырганского и Айского массивов одноименного комплекса раннего триаса, а также в еландинском монцодиорит-габбровом комплексе среднего кембрия [34]. В Салаире монцониты и сиениты, с которыми парагенетически связаны медно-молибденные проявления, присутствуют в жерновском монцонит-граносиенит-гранит-лейкогранитовом комплексе [35].

В северо-восточной части Горного Алтая на стыке горно-алтайских, горно-шорских и салаирских структур сформировался аномальный тектонический блок, в котором главные разломы, сопровождаемые тектонитами с признаками сдвигового пластического течения, имеют северо-восточную ориентировку. В этом тектоническом блоке проявлены сиенитоиды и монцониты, входящие в состав ульменского пироксенит-сиенит-монцонит-габбрового комплекса среднего кембрия (рис. 1).

К области распространения сиенитов Сия-Ушпинского междуречья пространственно тяготеют месторождения и проявления золото-медно-скарнового, золото-сульфидно-кварцевого геолого-промышленных типов, а также промышленные россыпи золота по рекам Ульмень, Ушпа, Салазан и Сия. По некоторым из них в настоящее время проводится добыча россыпного золота.

Для определения закономерностей формирования золотого оруденения, распространенного в Сия-Ушпинском междуречье, необходимо изучение петрологии и геохимии умеренно-щелочных пород – сиенитов и монцонитов, а также уточнение их абсолютного возраста.

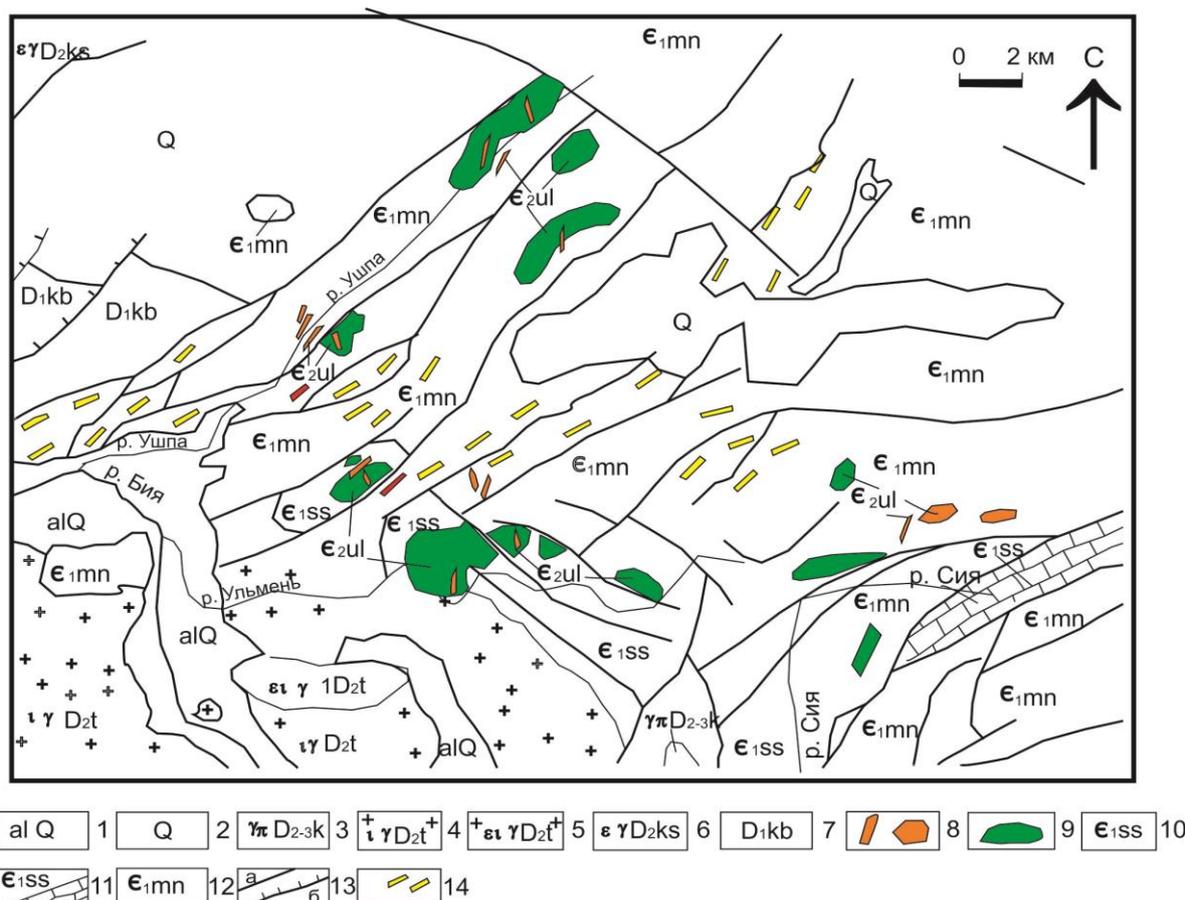


Рис. 1. Геологическое строение Сия-Ушпинского междуречья: 1 – аллювиальные образования квартера; 2 – неразделённые образования квартера; 3 – гранит-порфиры кызылташского комплекса; турочакский комплекс: 4 – лейкограниты, 5 – сиено-лейкограниты; 6 – сиенограниты кистальского комплекса; 7 – пестроцветные песчаники, алевролиты, конгломераты кубойской свиты; ульменский комплекс: 8 – малые интрузии и дайки сиенитов, 9 – габбро и пироксениты; сиянская свита: 10 – песчаники и алевролиты; 11 – известняки и мраморы; 12 – алевролиты, туфы, сланцы, базальты манжерокской свиты; 13 – разломы: а – сложной кинематики, б – надвиги; 14 – тектониты

Fig. 1. Schematic map of geological structure of Siya-Ushpinsky interfluvium: 1 – alluvial deposits of quarter; 2 – undivided deposits of the quarter; 3 – granite-porphyry of the Kyzyltash complex; Turochak complex: 4 – leucogranites; 5 – sieno-leucogranites; 6 – sienogranites of the Kistal complex; 7 – particolored sandstones, aleurolites, conglomerates of the Kuboy suite; Ulmen complex: 8 – dikes and small intrusions of syenites, 9 – gabbro and pyroxenites; Siya suite: 10 – aleurolites and sandstones; 11 – limestones and marbles; 12 – aleurolites, tuffs, slates, basalts of the Manzherok suite; 13 – faults: a – complex kinematics, b – thrusts; 14 – tectonites

Материалы и методы исследования

Полевое изучение взаимоотношений сиенитов и монцонитов проведено в районе Большого Личима, Ушпы, Ульмени, Верхнего Каракана, Салазана в пределах Сия-Ушпинского междуречья. Проба для определения абсолютного возраста отобрана из самостоятельного небольшого тела щелочных сиенитов Западного участка Ульменского рудного поля (рис. 2). Абсолютное датирование выполнено U-Pb методом с помощью ионного микрозонда SHRIMP-II по циркону в Лаборатории ВСЕГЕИ (г. Санкт-Петербург). Материалы исследования также составили результаты силикатных и микроэлементных анализов разных лет, выполненных методом ICP-MS для сиенитов (Большой Личим, Ульмень, Верхний Каракан, Салазан), щелочных сиенитов (Большой Личим, Ульмень), кварцевых монцонитов (Ушпа), монцонитов (Верхний Каракан).

Геохимические данные интерпретировались с помощью комплекса диаграмм – ТАС-диаграммы по [36]; $\text{SiO}_2 - \text{A.R.}$ по [37]; $\text{K}_2\text{O} - \text{SiO}_2$; диаграмм состава экспериментальных расплавов из плавления фельзических пелитов (мусковитовых сланцев), метаграувакк и амфиболитов [38]; диаграммы $\text{Au} - \text{TE}_{1,3}$. Тетрад-эффект фракционирования РЗЭ ($\text{TE}_{1,3}$) рассчитан по методике В. Ирбер [39]. Значения редкоземельных элементов нормированы относительно хондрита [40]. Eu^* рассчитан по формуле $(\text{Sm}_N + \text{Gd}_N)/2$.

Абсолютная датировка сиенитов

Цирконы темно-коричневого цвета, прозрачные, полупрозрачные и мутные. Представлены идиоморфными кристаллами короткопризматического облика и их обломками. Длина зерен 100–250 мкм, коэффициент удлинения от 1 до 2. В катодолуминесценции кристаллы и их обломки слабого свечения двухфаз-

ного строения: более светлая центральная часть с элементами секториальной зональности и темная краевая. Все точки измерений относятся к центральным частям циркона.

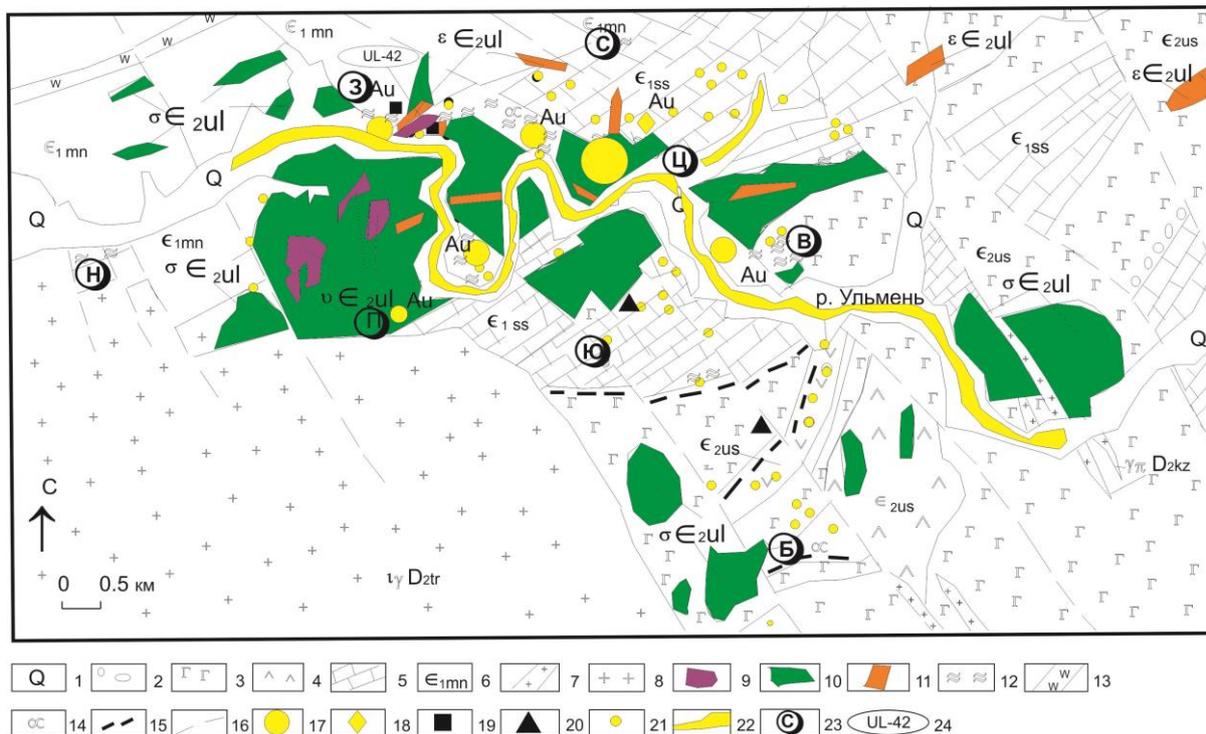


Рис. 2. Схема геологического строения и золотоносность Ульменского рудного поля (составлена А.И. Гусевым с учётом материалов Ю. Тверитинова): 1 – современные аллювиальные образования; усть-семиная свита: 2 – конгломераты; 3 – лавы, туфы базальтов и трахибазальтов; 4 – лавы и туфы андезитов, трахиандезитов; 5 – известняки и мраморы сиенской свиты; 6 – алевролиты, сланцы, туфы, базальты манжерокской свиты; 7 – гранит-порфиры кызылташского комплекса; 8 – граниты и лейкограниты турочакского комплекса; ульменский комплекс: 9 – пироксениты, габбро-пироксениты I фазы; 10 – габбро II фазы; 11 – монцитоны, кварцевые щелочные сиениты и сиениты III фазы; 12 – скарны; 13 – кварциты; 14 – зоны лимонитизации; 15 – зоны рассланцевания; 16 – разломы; 17 – золото-медно-скарновые руды; 18 – золото-сульфидно-кварцевые проявления; 19 – «железные шляпы» и лимонитовые «сухари»; 20 – проявления магнетита; 21 – находки золота в шихах; 22 – россыпи золота; 23 – золотоносные участки рудного поля: Ц – Центральный, В – Восточный, З – Западный, К – Каменный, Ю – Южный, С – Северный, П – Первый, Н – Нижний, Б – Берёзовско-Макарьевский; 24 – место отбора пробы для определения абсолютного возраста сиенитов

Fig. 2. Schematic map of geological structure and auriferous of Ulmen ore field (created by A.I. Gusev taking into account the materials of Yu. Tveritinov): 1 – modern alluvial deposits; ust-semin suite: 2 – conglomerates; 3 – lavas, tuffs of basalts and trachybasalts; 4 – lavas and tuffs of andesites, trachyandesites; 5 – limestones and marbles of the Siya suite; 6 – siltstones, tuffs, shales, basalts of the Manzherok suite; 7 – granite-porphry of the Kyzyltash complex; 8 – granites, leucogranites of the Turochak complex; Ulmen complex: 9 – pyroxenites, gabbro-pyroxenites of the first phase; 10 – gabbro of the second phase; 11 – monzonites, quartz alkaline syenites and syenites of the third phase; 12 – skarns; 13 – quartzite; 14 – zones of limonitization; 15 – zones of foliation; 16 – faults; 17 – gold-copper-skarn ores; 18 – gold-sulfide-quartz manifestations; 19 – gossan; 20 – manifestation of magnetite; 21 – finds of gold in concentrates; 22 – placers of gold; 23 – gold-bearing areas of the ore field: Ц – Central; В – Eastern; З – Western; К – Rock; Ю – Southern; С – Northern; П – First; Н – Lower; Б – Berezovsko-Makaryevsky; 24 – sampling point for syenites absolute age determination

Содержание в цирконе (ppm): U=446–8412, Th=176–8307, Th/U=0,27–1,02. По результатам U-Pb датирования по цирконам получена дискордия с верхним пересечением 504±7 млн лет. Из них для 8 анализов (8.1, 11.1, 3.1, 1.1, 6.1, 2.1, 4.1, 7.1) установлен конкордантный возраст 501±4 млн лет. Изотопный состав Pb, U, Th в цирконах сиенитов и абсолютные возраста замеров приведены в таблице.

Возраст кристаллизации сиенитов среднекембрийский, близкий к границе с поздним кембрием.

Петро-геохимия породных типов

Сиенитоидная группа пород ульменского комплекса представлена монцитонами, кварцевыми монцитонами, сиенитами и псевдолейцитовыми сиенитами. Они встречаются как самостоятельные дайки и входят в состав малых интрузивных тел. При этом псевдолейцитовые сиениты в сложных телах встречаются в центральных частях совместно с монцитонами среди сиенитов в виде небольших фрагментов 2×3 м. Полевое изучение пород показало, что монцитониты претерпели дробление и вторичные

изменения в приконтактовых частях. Монцониты и кварцевые монцониты в таких телах присутствуют в виде ксенолитовых образований среди сиенитов, обычно в центральных частях. Это указывает на то, что монцонитоиды

образуют самую раннюю фазу внедрения, подвергнувшись дроблению после кристаллизации. Таким образом, можно выделить следующие интрузивные фазы: 1) монцониты, 2) щелочные сиениты, 3) сиениты.

Таблица. Абсолютные возраста и изотопный состав Pb, U, Th в цирконах сиенитов Ульменского рудного поля
Table. Absolute ages and isotopic composition of Pb, U, Th in zircons of syenites of Ulmen ore field

| Точки замеров Test points | $^{206}\text{Pb}_c$ % | U, г/г ppm | Th, г/г ppm | $\frac{^{232}\text{Th}}{^{238}\text{U}}$ | $\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$ Возраст, млн лет Age, Ma | $\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$ Возраст, млн лет Age, Ma | $\frac{^{238}\text{U}}{^{206}\text{Pb}}$ | $\frac{^{207}\text{Pb}^*}{^{206}\text{Pb}^*}$ | $\frac{^{207}\text{Pb}^*}{^{206}\text{Pb}^*}$ | $\frac{^{206}\text{Pb}^*}{^{238}\text{U}}$ |
|------------------------------|--------------------------|------------------|-------------------|--|---|--|--|---|---|--|
| 5.1 | 0,17 | 1426 | 560 | 0,41 | 453±8 | 527±20 | 13,7 | 0,0579 | 0,58 | 0,073 |
| 12.1 | 0,04 | 1120 | 471 | 0,43 | 468±6 | 516±21 | 13,3 | 0,0576 | 0,60 | 0,075 |
| 10.1 | 0,01 | 2049 | 602 | 0,3 | 475±6 | 510±14 | 13,1 | 0,0575 | 0,61 | 0,076 |
| 8.1 | – | 1216 | 616 | 0,52 | 482±7 | 507±19 | 12,9 | 0,0574 | 0,61 | 0,078 |
| 11.1 | 0,04 | 1361 | 355 | 0,27 | 494±4 | 503±17 | 12,5 | 0,0573 | 0,63 | 0,080 |
| 3.1 | 0,02 | 2589 | 558 | 0,34 | 499±4 | 506±12 | 12,4 | 0,0574 | 0,64 | 0,080 |
| 1.1 | – | 446 | 176 | 0,41 | 505±4 | 527±30 | 12,3 | 0,0579 | 0,65 | 0,081 |
| 6.1 | 0,05 | 3249 | 2177 | 0,69 | 508±6 | 496±11 | 12,2 | 0,0571 | 0,65 | 0,082 |
| 2.1 | 1,28 | 2283 | 1797 | 0,81 | 514±9 | 547±47 | 12,0 | 0,0584 | 0,67 | 0,083 |
| 4.1 | 0,40 | 2413 | 2039 | 0,87 | 515±8 | 515±17 | 12,0 | 0,0576 | 0,66 | 0,083 |
| 7.1 | 0,91 | 2969 | 1315 | 0,46 | 515±14 | 507±22 | 12,0 | 0,0574 | 0,66 | 0,083 |
| 9.1 | 0,14 | 8412 | 5307 | 1,02 | 563±9 | 486±8 | 11,0 | 0,0569 | 0,72 | 0,091 |

Пояснение. Ошибки равны 1-сигма. Pb_c – обычная часть свинца; Pb^* – радиогенная часть свинца. Общий Pb скорректирован с помощью измеренного изотопа ^{204}Pb .

Note. Errors are equal to 1-sigma; Pb_c – common part of lead; Pb^* – radiogenic part of lead. Total Pb is corrected using measured ^{204}Pb isotope.

Монцониты представляют собой крупнокристаллические породы серой окраски. Они более крупнокристаллические, чем сиенитоиды. Состав (%): зональный кали-натровый полевой шпат (30–32), роговая обманка (f=51–59) (2–3), клинопироксен (6–8), биотит (4–5), плагиоклаз (36–41), который по составу отвечает номерам 32–46. Акцессории: магнетит, апатит, циркон, сульфиды, сфен, пренит, турмалин. В краевых частях зонального кали-натрового полевого шпата присутствуют микровключения салита, биотита, плагиоклаза. Биотит по составу соответствует сидерофиллиту. Темноцветные минералы местами замещены эпидотом и хлоритом. В кварцевых монцонитах появляется кварц (2–3 %).

Щелочные сиениты чаще всего имеют серо-розовую и красновато-розоватую окраску, среднекристаллическое сложение. Микроструктура гипидиоморфнозернистая и микроклин-пертитовая. Состав (%): озаннит – 6–10, роговая обманка обыкновенная – 4–7, эпидот – 2–3, плагиоклаз – 10–15, микроклин – 75–80. Акцессорные минералы: циркон, апатит, сфен, сульфиды, ортит, пренит – единичные зёрна. Озаннит образует оvoidные выделения размерами до 1 см, создавая порфириовидную структуру. Обыкновенная роговая обманка образует скопления мелких зёрен с отчётливым плеохроизмом от желтовато-зеленоватого до зеленовато-синего. Замещается эпидотом и хлоритом. Плагиоклаз определён олигоклазом № 10–12, местами сильно пелитизирован. Микроклин-пертит наблюдается в виде крупных изометричных выделений, нередко имеющих зональное строение. В центре их локализуется плагиоклаз (альбит), на который нарастает микроклин-пертит. Изредка отмечаются миароловые пустотки, инкрустированные по краям таблитчатыми кристалликами полевого шпата, эпидота и пренита.

Сиениты – мелкозернистые породы светло-серого с розоватым оттенком и светло-красного цвета. Имеют гипидиоморфнозернистую микроструктуру. Перечень минералов (%): микроклин-пертит – 75–80, плагиоклаз – 7–10, роговая обманка – 5–9, кварц – 1–2, эпидот – 1–2, апатит, циркон, сфен, сульфиды – единичные зёрна. Преобладающий микроклин-пертит формирует изометричные зёрна, редко – крупные призматические выделения, имеющие зональное строение. В ядре таких кристаллов отмечается более интенсивная пелитизация. Плагиоклаз наблюдается в виде таблитчатых выделений и относится к альбит-олигоклазу с № 8–18. Обыкновенная роговая обманка окрашена в зеленовато-синеватые оттенки, ксеноморфна и часто замещается эпидотом и хлоритом.

Химический состав пород ульменского комплекса отражен в работе [41].

На диаграмме TAC по [36] сиениты и монцониты попадают в соответствующие поля (рис. 3, а). Щелочные сиениты на этой диаграмме попадают в поле фельдшпатоидных сиенитов, а на диаграмме A.R. – SiO_2 по [37] они локализируются в области пералкальных пород (рис. 3, б).

Диаграмма $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ позволяет относить анализируемые породы к банакитам шошонитовой серии (рис. 4).

На спайдер-диаграмме просматриваются в целом согласованные кривые распределения редкоземельных элементов для всех типов пород. На этом фоне видны негативная европиевая аномалия, а также пониженные концентрации празеодима в некоторых пробах сиенитов (рис. 5). Отрицательная аномалия по европию во всех породных типах также подтверждается низкими отношениями Eu/Eu^* , варьирующими от 0,36 до 0,51.

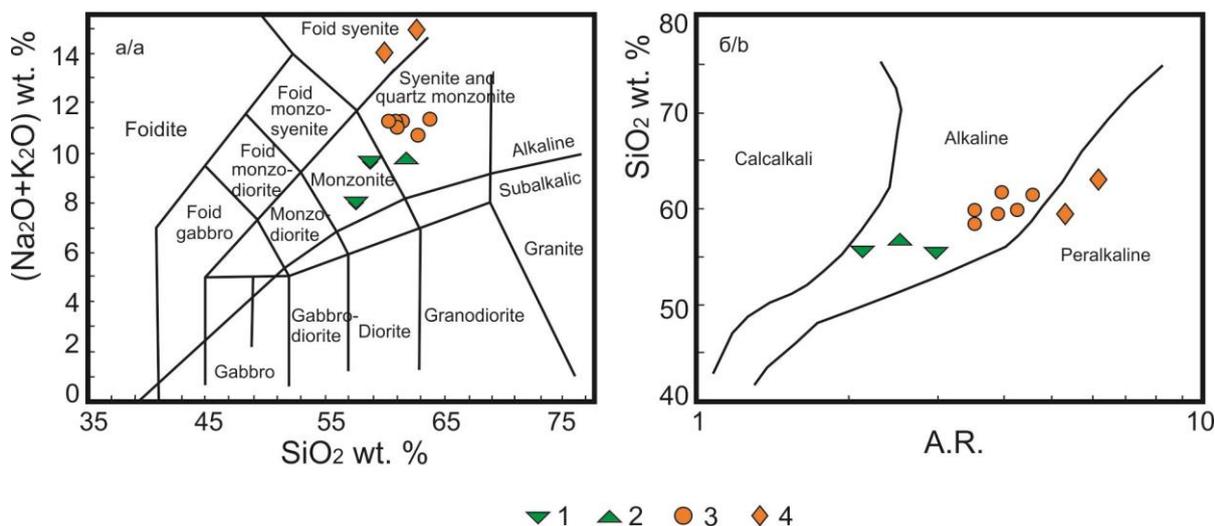


Рис. 3. Сиениты и монзониты Сия-Ушпинского междуречья на диаграммах: а) ТАС-диаграмма по [36]; б) $\text{SiO}_2 - \text{A.R.}$ по [37]. Породы: 1 – монзониты; 2 – кварцевые монзониты; 3 – сиениты; 4 – щелочные сиениты. $\text{A.R.} = [\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}] / [\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO} - \text{Na}_2\text{O} - \text{K}_2\text{O}]$

Fig. 3. Plots: a) TAS-plot [36]; b) $\text{SiO}_2 - \text{A.R.}$ [37] for syenites and monzonites of the Siya-Ushpinsky interfluvium. Rocks: 1 – monzonites; 2 – quartz monzonites; 3 – syenites; 4 – alkaline syenites. $\text{A.R.} = [\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}] / [\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO} - \text{Na}_2\text{O} - \text{K}_2\text{O}]$

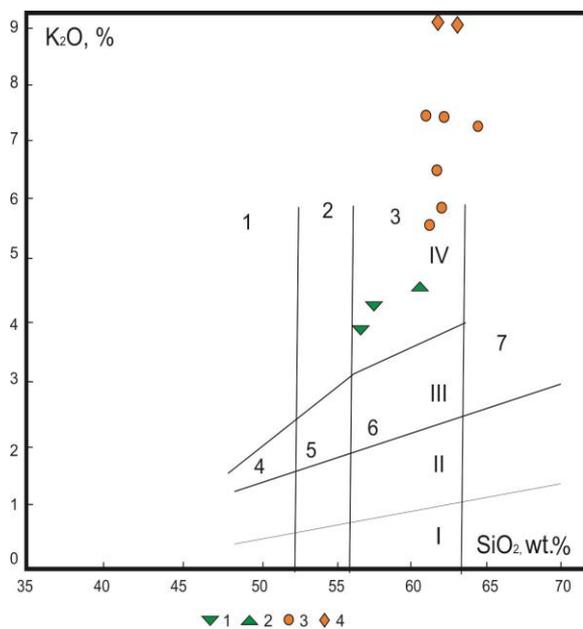


Рис. 4. Сиениты и монзониты Сия-Ушпинского междуречья на диаграмме $\text{K}_2\text{O} - \text{SiO}_2$. Поля пород: 1 – абсарокит; 2 – шошонит; 3 – банакит; 4 – высоко-калиевый базальт; 5 – высоко-калиевый андезитобазальт; 6 – высоко-калиевый андезит; 7 – высоко-калиевый дацит по [42]. Серии пород: I – толеитовая; II – известково-щелочная; III – высоко-калиевая известково-щелочная; IV – шошонитовая. Условные обозначения – на рис. 3

Fig. 4. Plot $\text{K}_2\text{O} - \text{SiO}_2$ for syenites and monzonites of the Siya-Ushpinsky interfluvium. Rock fields: 1 – absarokite; 2 – shoshonite; 3 – banakite; 4 – K-rich basalt; 5 – K-rich andesite basalt; 6 – K-rich andesite; 7 – K-rich dacite is presented according to [42]. Series of rocks: I – tholeiitic; II – calc-alkaline; III – K-rich calc-alkaline; 4 – shoshonite. Legend is shown in Fig. 3.

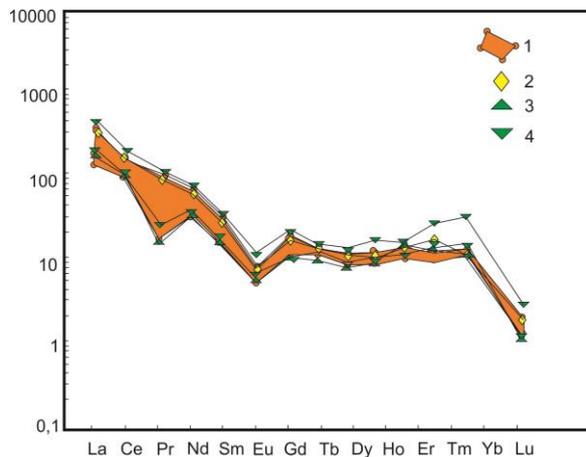


Рис. 5. Распределение РЗЭ в сиенитах и монзонитах Сия-Ушпинского междуречья. Значения нормированы относительно хондрита [40]. 1 – обобщённый контур распределения РЗЭ в сиенитах; 2 – щелочные сиениты; 3 – кварцевые монзониты; 4 – монзониты

Fig. 5. REE distribution in syenites and monzonites of the Siya-Ushpinsky interfluvium. Values are normalized to chondrite according to [40]. 1 – generalized outline of REE distribution in syenites; 2 – alkaline syenites; 3 – quartz monzonites; 4 – monzonites

Интерпретация результатов

Высокие отношения Nb/Ta (от 19,0 до 31,4) и Zr/Hf (от 30,4 до 60,6) в сиенитоидах и монзонитах Сия-Ушпинского междуречья свидетельствуют о вовлечении в плавление материала нижней коры [43]. Относительно низкие концентрации Ni (от 2,3 до 4,1 г/т), Sr (от 1,0 до 3,2 г/т) и MgO (от 0,27 до 1,39 %) в сиенитах и монзонитах указывают на то, что они не могли быть продуктом прямого плавления мантийной магмы и результатом фракционирования мафических минералов из эволюционированного расплава [44, 45].

Следовательно, наиболее вероятна их генерация при плавлении пород нижней коры.

Экспериментальные диаграммы, полученные в результате плавления разных типов пород земной коры, позволяют реставрировать источник плавления для магматических пород. На таких диаграммах отчетливо видно, что составы сиенитоидов и монцонитов Сия-Ушпинского междуречья попадают или близко тяготеют к полям плавления амфиболитов и граувак (рис. 6, а–в).

На диаграмме $A/CNK - SiO_2$ составы сиенитов и монцонитов тяготеют к средним составам сланцев Северной Америки и пост-архейским Австралийским осадочным породам (рис. 6, д).

Следовательно, генерация сиенитов и монцонитов Сия-Ушпинского междуречья происходила по сценарию, в котором основная роль отводится расплавам, сформированным в результате частичного плавления материала нижней утолщенной коры.

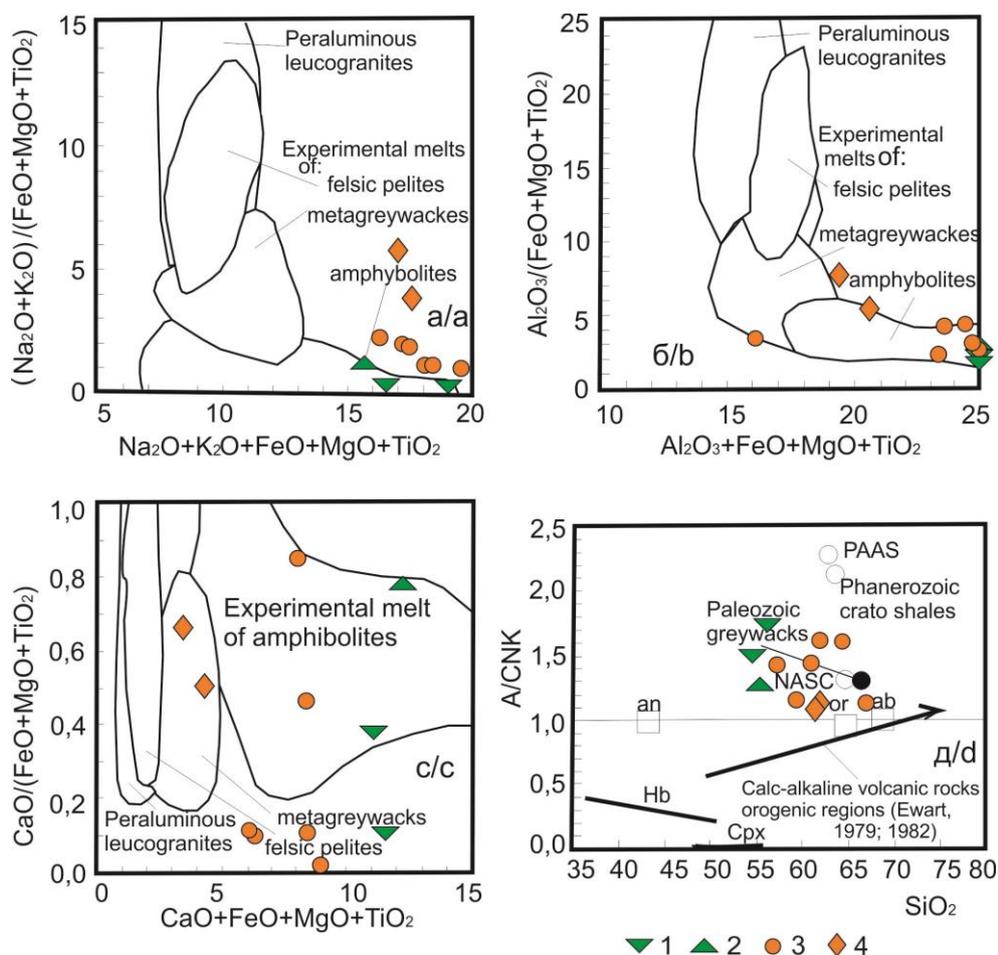


Рис. 6. Монцониты и сиениты Сия-Ушпинского междуречья на экспериментальных диаграммах: а–в) диаграммы состава экспериментальных расплавов из плавления фельзических пелитов (мусковитовых сланцев), мета-граувакк и амфиболитов [38]; д) диаграмма $A/CNK - SiO_2$ [46, 47]. Тренд известково-щелочного фракционирования вулканических пород орогенных регионов показан по [46, 47]. А – Al_2O_3 , CNK – сумма CaO, Na_2O , K_2O . NASC – сланцы Северной Америки; PAAS – средний состав пост-архейских осадочных пород Австралии. Остальные условные обозначения показаны на рис. 3

Fig. 6. Experimental plots: а–с) plots of composition of experimental melts from melting felsic pelites (muscovite shales), metagreywack and amphibolite [38] for monzonites and syenites of the Siya-Ushpinsky interfluve; д) plot $SiO_2 - A/CNK$ [46, 47] for monzonites and syenites of the Siya-Ushpinsky interfluve. The trend of calc-alkaline fractionation of volcanic rocks of orogenic regions is presented according to [46, 47]. A – Al_2O_3 , CNK – sum of CaO, Na_2O , K_2O . NASC – composition of the shale of North America; PAAS – average composition of post-Archean sedimentary rocks of Australia. Legend is shown in Fig. 3

Рудоносность сиенитоидов Сия-Ушпинского междуречья проявлена в том, что пространственно с областью распространения сиенитов и монцонитов связаны многочисленные проявления золота, золотоносные россыпи, а также Ульменское золото-медно-скарновое месторождение. На последнем наиболее

богатое оруденение тяготеет к дайкам сиенитов. Содержания золота в породных типах имеют широкий диапазон величин – от 152 до 255 г/т, а тренд увеличения концентраций металла коррелируется с увеличением значений тетрад-эффекта М-типа в спектре распределения редкоземельных элементов (рис. 7).

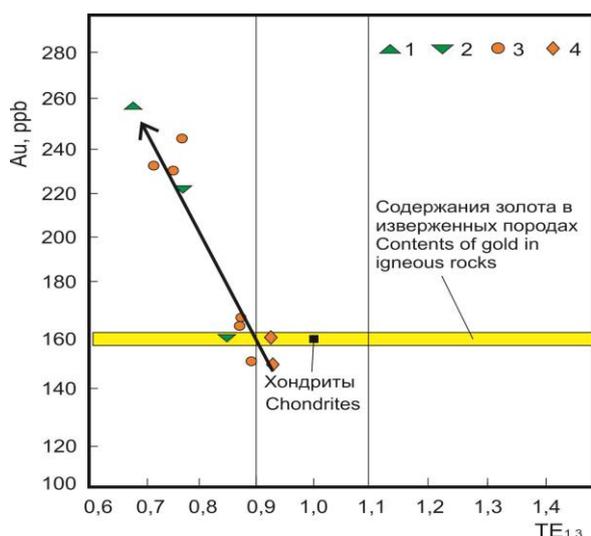


Рис. 7. Сиениты и монзониты Сия-Ушпинского междуречья на диаграмме Au–TE_{1,3} (разработана А.И. Гусевым). Содержания золота в изверженных породах приняты по [48]. Концентрации золота в хондритах приведены по [49]. Условные обозначения показаны на рис. 3

Fig. 7. Au–TE_{1,3} plot for syenites and monzonites of the Siya-Ushpinsky interfluve (created by A.I. Gusev). The gold content in igneous rocks is taken according to [48]. Gold concentration in chondrites is shown according to [49]. Legend is presented in Fig. 3

Как известно, проявление тетрад-эффекта фракционирования РЗЭ М-типа в интрузивных породах обусловлено активностью во флюидах таких летучих компонентов, как CO₂ и H₂O. Это позволяет предполагать, что перенос золота и других металлов из глубинного очага к местам рудолокализации происходил при участии магматогенных флюидов, обогащённых этими летучими компонентами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Jung S., Hauff F., Berndt J. Generation of a potassic to ultrapotassic alkaline complex in a syn-collisional setting through flat subduction: constraints on magma sources and processes (Otjimbingwe alkaline complex, Damara orogen, Namibia) // Gondwana Research. – 2020. – V. 82. – P. 267–287.
- Coulson I.M., Russell J.K., Dipple G.M. Origins of the Zippa Mountain pluton: a Late Triassic, arc-derived, ultrapotassic magma from the Canadian Cordillera // Canadian Journal of Earth Sciences. – 1999. – V. 36. – № 9. – P. 1415–1434.
- Petrogenesis of an alkali syenite-granite-rhyolite suite in the Yanshan fold and Thrust Belt, Eastern North China Craton: geochronological, geochemical and Nd-Sr-Hf isotopic evidence for lithospheric thinning / J.-H. Yang, F.-Y. Wu, S.A. Wilde, F. Chen, X.-M. Liu, L.-W. Xie // Journal of Petrology. – 2008. – V. 49. – № 2. – P. 315–351.
- Trace elements and Sr–Nd–Pb isotopes of K-rich, shoshonitic, and calc-alkaline magmatism of the Western Mediterranean Region: genesis of ultrapotassic to calc-alkaline magmatic associations in a post-collisional geodynamic setting / S. Conticelli, L. Guarnieri, A. Farinelli, M. Mattei, R. Avanzinelli, G. Bianchini, E. Boari, S. Tommasini, M. Tiepolo, D. Prelević, G. Venturelli // Lithos. – 2009. – V. 107. – № 1–2. – P. 68–92.
- Petrogenesis of silica-saturated and silica-undersaturated syenites in the northern North China Craton related to post-collisional and intraplate extension / J.-H. Yang, J.-F. Sun, M. Zhang, F.-Y. Wu, S.A. Wilde // Chemical Geology. – 2012. – V. 328. – P. 149–167.
- Alkali-calcic and alkaline post-orogenic (PO) granite magmatism: petrologic constraints and geodynamic settings / B. Bonin, A. Azzouni-Sekkal, F. Bussy, S. Ferrag // Lithos. – 1998. – V. 45. – № 1–4. – P. 45–70.
- Sylvester P.J. Post-collisional alkaline granites // The Journal of Geology. – 1989. – V. 97. – № 3. – P. 261–280.
- Whalen J.B., Currie K.L., Chappell B.W. A-type granites: geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis // Contributions to Mineralogy and Petrology. – 1987. – V. 95. – P. 407–419.
- Origin of Late Permian syenite and gabbro from the Panxi rift, SW China: the fractionation process of mafic magma in the inner zone of the Emeishan mantle plume / Z. Zhang, J. Qin, S. Lai, X. Long, Y. Ju, X. Wang, Y. Zhu, F. Zhang // Lithos. – 2019. – V. 346–347. – Article 105160.

Заключение

Сиениты Сия-Ушпинского междуречья имеют абсолютный возраст 501±4 млн лет, отвечающий концу среднего кембрия. Химизм монзонитов и сиенитов уверенно диагностирует их принадлежность к шошонитовой серии пород. Их генезис связывается с частичным плавлением утолщённой нижней коры. Породы были насыщены флюидами, в которых важная роль принадлежала CO₂ и H₂O. Последние играли важнейшую роль в проявлении тетрад-эффекта фракционирования РЗЭ и переносе золота.

- Sources and settings of Ediacaran post-collisional syenite-monzonite-diorite shoshonitic magmatism from southernmost Brazil / D.F. Padilha, M.F. Bitencourt, L.V.S. Nardi, L.M. Florisbal, C. Reis, M. Galdes, B.S. Almeida // Lithos. – 2019. – V. 344–345. – P. 482–503.
- Yan X., Jiang Sh.-Y. Petrogenesis and tectonic implications of Early Cretaceous shoshonitic syenites in the northern Wuyi Mt Range, Southeast China // Journal of Asian Earth Sciences. – 2019. – V. 180. – Article 103877.
- The formation of shoshonitic magma and its relationship to porphyry-type mineralisation: the Maronia pluton in NE Greece / A. Schaarschmidt, R. Klemd, M. Regelous, P.C. Voudouris, V. Melfos, K.M. Haase // Lithos. – 2021. – V. 380–381. – Article 105911.
- Temporal-spatial analysis of alkaline rocks based on GEOROC / M. Zhang, C. Wang, Q. Zhang, Y. Qin, J. Shen, X. Hu, G. Zhou, S. Li // Applied Geochemistry. – 2021. – V. 124. – Article 104853.
- Mg, Sr, and O isotope geochemistry of syenites from northwest Xinjiang, China: Tracing carbonate recycling during Tethyan oceanic subduction / S. Ke, F.-Z. Teng, S.-G. Li, T. Gao, S.-A. Liu, Y. He, X. Mo // Chemical Geology. – 2016. – V. 437. – P. 109–119.
- Litvinovsky B.A., Jahn B.M., Eyal M. Mantle-derived sources of syenites from the A-type igneous suites – new approach to the provenance of alkaline silicic magmas // Lithos. – 2015. – V. 232. – P. 242–265.
- Petrogenesis of coeval silica-saturated and silica-undersaturated alkaline rocks: Mineralogical and geochemical evidence from the Saima alkaline complex, NE China / Y.-S. Zhu, J.-H. Yang, J.-F. Sun, J.-H. Zhang, F.-Y. Wu // Journal of Asian Earth Sciences. – 2016. – V. 117. – P. 184–207.
- Petrogenesis of post-orogenic syenites in the Sulu Orogenic Belt, East China: geochronological, geochemical and Nd–Sr isotopic evidence / J.-H. Yang, S.-L. Chung, S.A. Wilde, F.-Y. Wu, M.-F. Chu, C.-H. Lo, H.-R. Fan // Chemical Geology. – 2005. – V. 214. – № 1–2. – P. 99–125.
- Isotopic evidence for the origin of Cenozoic volcanic rocks in the Pinacate volcanic field, northwestern Mexico / D.J. Lynch, T.E. Musselman, J.T. Gutmann, P.J. Patchett // Lithos. – 1993. – V. 29. – № 3–4. – P. 295–302.
- Potassic igneous rocks from the vicinity of epithermal gold mineralization, Lihir Island, Papua New Guinea / D. Müller,

- L. Franz, P.M. Herzig, S. Hunt // *Lithos.* – 2001. – V. 57. – Iss. 2–3. – P. 163–186.
20. The Kirganik alkalic porphyry Cu-Au prospect in Kamchatka, Eastern Russia: a shoshonite-related, silica-undersaturated system in a Late Cretaceous island arc setting / S.G. Soloviev, S.G. Kryazhev, V.N. Shapovalenko, G.S. Collins, S.S. Dvurechenskaya, D.S. Bukhanova, A.I. Ezhov, K.I. Voskresensky // *Ore Geology Reviews.* – 2021. – V. 128. – Article 103893.
21. A metasomatized 18O-rich veined lithospheric mantle source for ultrapotassic magmas / W. Fan, N. Jiang, J. Hu, D. Liu, L. Zhao, T. Li // *Lithos.* – 2021. – V. 382–383. – Article 105964.
22. Dai F.-Q., Zhao Z.-F., Zheng Y.-F. Partial melting of the orogenic lower crust: Geochemical insights from post-collisional alkaline volcanics in the Dabie orogen // *Chemical Geology.* – 2017. – V. 454. – P. 25–43.
23. Late Triassic melting of a thickened crust in southeastern China: evidence for flat-slab subduction of the Paleo-Pacific plate / K.-Y. Zhu, Z.-X. Li, X.-S. Xu, S.A. Wilde // *Journal of Asian Earth Sciences.* – 2013. – V. 74. – P. 265–279.
24. Huang W.-L., Wyllie P.J. Melting reactions in the system NaAlSi₃O₈-KAlSi₃O₈-SiO₂ to 35 kilobars, dry and with excess water // *The Journal of Geology.* – 1975. – V. 83. – № 6. – P. 737–748.
25. Green core clinopyroxenes from Martin Vaz Archipelago Plio-Pleistocene alkaline rocks, South Atlantic Ocean, Brazil: a magma mixing and polybaric crystallization record / A.L. de Oliveira, A.C. dos Santos, C.C. Nogueira, T.M. Maia, M.C. Geraldes // *Journal of South American Earth Sciences.* – 2021. – V. 105. – Article 102951.
26. Potassic volcanic rocks and adakitic intrusions in southern Tibet: insights into mantle-crust interaction and mass transfer from Indian plate / D. Liu, Z. Zhao, D.J. DePaolo, D.-C. Zhu, F.-Y. Meng, Q. Shi, Q. Wang // *Lithos.* – 2017. – V. 268–271. – P. 48–64.
27. Rukhlov A.S., Blinova A.I., Pawlowicz J.G. Geochemistry, mineralogy and petrology of the Eocene potassic magmatism from the Milk River area, southern Alberta, and Sweet Grass Hills, northern Montana // *Chemical Geology.* – 2013. – V. 353. – P. 280–302.
28. Dostal J., Shellnutt J.G., Church B.N. Petrogenesis of an Eocene syenitic intrusion from south-central British Columbia: Evidence for increasing influence of cratonic Laurentia on alkaline magmatism of western North America // *Lithos.* – 2019. – V. 332–333. – P. 67–82.
29. Дворник Г.П., Угрюмов А.Н., Балахонов В.С. Метасоматиты и золотоджаспероидное оруденение в контактовой зоне Аномального щелочного массива с вмещающими карбонатными породами // *Известия Уральского государственной горно-геологической академии. Серия: Геология и геофизика.* – 2003. – Вып. 18. – С. 105–109.
30. Гусев А.И. Золотоносные щелочные магматические комплексы // *Успехи современного естествознания.* – 2012. – № 9. – С. 47–52.
31. Yulong Deposit, Eastern Tibet: a high-sulfidation Cu-Au porphyry copper deposit in the Eastern Indo-Asian Collision Zone / Z. Hou, Y. Xie, W. Xu, Y. Li, X. Zhu, Z. Khin, G. Beaudoin, Z. Rui, W. Huang, C. Luobu // *International Geology Review.* – 2007. – V. 49. – Iss. 3. – P. 235–258.
32. Zircon indicators of fluid sources and ore genesis in a multi-stage hydrothermal system: the Dongping Au deposit in North China / H. Li, J.-W. Li, T.J. Algeo, J.-H. Wu, M. Cisse // *Lithos.* – 2018. – V. 314–315. – P. 463–478.
33. Bao Z., Li C., Zhao Z. Metallogeny of the syenite-related Dongping gold deposit in the northern part of the North China Craton: a review and synthesis // *Ore Geology Reviews.* – 2016. – V. 73. – P. 2. – P. 198–210.
34. Корреляция магматических и метаморфических комплексов западной части Алтае-Саянской складчатой области / С.П. Шокальский, Г.А. Бабин, А.Г. Владимиров, Н.И. Гусев, В.Н. Токарев, В.А. Зыбин, В.С. Дубский, О.В. Мурзин, В.А. Кривчиков, Н.Н. Крук, С.Н. Руднев, Г.С. Федосеев, А.В. Титов, В.П. Сергеев, Н.Н. Лихачёв, А.Н. Мамлин, Е.И. Котельников, С.А. Кузнецов, Л.Л. Зейферт, В.Д. Яшин, Ю.С. Носков, А.Н. Уваров, С.И. Федак, А.И. Гусев, С.А. Выставной. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал «Гео», 2000. – 187 с.
35. Гусев А.И., Табакаева Е.М. Магматизм и металлогения Салаира. – Бийск: АГПИУ им. В.М. Шукшина, 2017. – 182 с.
36. Middlemost E.A.K. Naming materials in the magma/igneous rock system // *Earth-Science Reviews.* – 1994. – V. 37. – № 3–4. – P. 215–224.
37. Wright J.B. A simple alkalinity ratio and its application to questions of non-orogenic granite genesis // *Geological Magazine.* – 1969. – V. 106. – № 4. – P. 370–384.
38. Patiño Douce A.E. What do experiments tell us about the relative contributions of crust and mantle to the origin of granitic magmas? // *Geological Society. Special Publications.* – 1999. – V. 168. – P. 55–75.
39. Irber W. The lanthanide tetrad effect and its correlation with K/Rb, Eu/Eu*, Sr/Eu, Y/Ho, and Zr/Hf of evolving peraluminous granite suites // *Geochimica et Cosmochimica Acta.* – 1999. – V. 63. – № 3–4. – P. 489–508.
40. Anders E., Grevesse N. Abundances of the elements: meteoritic and solar // *Geochimica et Cosmochimica Acta.* – 1989. – V. 53. – № 1. – P. 197–214.
41. Гусев А.И., Гусев Н.И., Одинцев А.В. Геохимия, петрология и генезис ульменского сиенит-пироксенит-габбрового комплекса Северного Алтая // *Природные ресурсы Горного Алтая: геология, геофизика, экология, минеральные, водные и лесные ресурсы Алтая.* – 2019. – № 1–2. – С. 29–40.
42. Peccerillo A., Taylor S.R. Rare earth elements in East Carpathian volcanic rocks // *Earth and Planetary Science Letters.* – 1976. – V. 32. – № 2. – P. 121–126.
43. Rudnick R.L., Gao S. Composition of the continental crust // *Treatise on Geochemistry. V. 3: the Crust / Ed. by R. Rudnick.* – Amsterdam: Elsevier, 2003. – P. 1–64.
44. Frost C.D., Frost B.R. Reduced rapakivi-type granites: the tholeiite connection // *Geology.* – 1997. – V. 25. – № 7. – P. 647–650.
45. Trace elements and Sr-Nd isotopic geochemistry and genesis of Jijie alkaline-ultramafic rocks, southern part of Panxi rift / Z. Zhao, L. Qi, Z.L. Huang, Z.F. Yan, C. Xu // *Acta Petrologica Sinica.* – 2012. – № 6. – P. 1915–1927.
46. Ewart A. A review of the mineralogy and chemistry of Tertiary-Recent dacitic, latitic, rhyolitic, and related salic volcanic rocks // *Trondjemites, Dacites, and Related Rocks.* – Amsterdam: Elsevier, 1979. – P. 13–121.
47. Ewart A. The mineralogy and petrology of Tertiary – recent orogenic volcanic rocks: with special reference to the andesitic-basaltic compositional range // *Andesites: Orogenic Andesites and Related Rocks.* – Chichester; New York; Brisbane; Toronto; Singapore: John Wiley and Sons, 1982. – P. 25–95.
48. Виноградов А.П. Среднее содержание химических элементов в горных породах // *Геохимия.* – 1962. – № 7. – С. 555–571.
49. Wasson J.T., Kallemeyn G.W. Compositions of chondrites // *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences.* – 1988. – V. 325. – № 1587. – P. 535–544.

Поступила 06.01.2021 г.

Информация об авторах

Гусев А.И., доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры естественно-научных дисциплин Алтайского государственного гуманитарно-педагогического университета им. В.М. Шукшина.

Табакаева Е.М., кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры экономической географии и картографии Алтайского государственного университета.

UDC 553.3/4:553.2:550.4

SYENITES AND MONZONITES IN THE SIYA-USHPINSKY INTERFLUVE OF GORNY ALTAI: ABSOLUTE AGE, GEOCHEMISTRY AND PETROLOGY

Anatoly I. Gusev¹,
anzerg@mail.ru

Evgeniya M. Tabakaeva²,
tabakaevaem@mail.ru

¹ Shukshin Altai State Humanities Pedagogical University,
53, Vladimir Korolenko street, Biysk, 659333, Russia.

² Altai State University,
61, Lenin avenue, Barnaul, 656049, Russia.

The relevance of the research is caused by the need to clarify the absolute age and to study the features of petrology and geochemistry of moderately alkaline rocks – syenites and monzonites of the Siya-Ushpinsky interfluve in the northeastern Altai mountains (Russia) – in order to determine the formation patterns of the associated gold mineralization. The problem of the origin of alkaline igneous rocks is still interesting for scientists in many countries due to the fact that these are the rocks used to confirm the mantle-crustal interaction and to determine the nature of the evolution of the continental crust. Today, there is still no single position on their origin.

The aims of the research are to clarify the absolute age of alkaline syenites of the Ulmen ore field and to study the petrological and geochemical features of syenitoids and monzonites of the Siya-Ushpinsky interfluve using a complex of petrological diagrams which help to reveal the physicochemical features of petrogenesis.

The main objects of the study were syenitoids and monzonites of the Ulmen pyroxenite-syenite-monzonite-gabbro complex of the Middle Cambrian, located in the Siya-Ushpinsky interfluve. This territory is located within the anomalous tectonic block formed at the junction of the Gomo-Altai, Gomo-Shor and Salair structures. Among the minerals, the objects of study are zircons from alkaline syenites of the western section of the Ulmen ore field.

Methods. The absolute age of the rocks was determined by the U-Pb secondary ion mass spectrometry method using a SHRIMP-II ion microprobe on zircon in the Laboratory of the Russian Geological Research Institute (Saint-Petersburg). Geochemical data were interpreted using a set of petrological diagrams. The tetrad effect of fractionation of REE ($TE_{1.3}$) was calculated by the method of V. Irber.

Results. Syenites in the Siya-Ushpinsky interfluve have the absolute age of 501 ± 4 Ma, which corresponds to the end of the Middle Cambrian. Data on the composition of syenites and monzonites of the Bolshoi Lichim, Ushpa, Ulmeni, Upper Karakan, Salazan areas within the Siya-Ushpinsky interfluve were obtained. The authors established the sequence of formation of rocks with the separation of three phases: phase 1 – monzonite, phase 2 – alkaline syenite, phase 3 – syenite. Monzonites and syenites belong to the rocks of the intermediate composition of the moderately alkaline series. In addition, the composition of the monzonites and syenites studied by us corresponds to the shoshonite series of rocks. High ratios of Nb/Ta (from 19,0 to 31,4) and Zr/Hf (from 30,4 to 60,6) in syenitoids and monzonites of the Siya-Ushpinsky interfluve indicate the involvement of lower crust material in melting. Relatively low concentrations of Ni (from 2,3 to 4,1 ppm), Cr (from 1,0 to 3,2 ppm) and MgO (from 0,27 to 1,39 %) in syenites and monzonites indicate that they could not be the product of direct melting of mantle magma and the result of fractionation of mafic minerals from the evolved melt. Consequently, in the generation of syenites and monzonites of the Siya-Ushpinsky interfluve, the main role was played by melts formed as a result of partial melting of the lower thickened crust. In the experimental diagrams that allow the restoration of the source of melting for igneous rocks, the compositions of syenitoids and monzonites of the Siya-Ushpinsky interfluve fall or close to the melting fields of amphibolites and graywackes. In the studied rocks, the tetrad effect of fractionation of M-type REEs was revealed, which indicates their saturation with fluids, among which such volatile components as CO₂ and H₂O, played an important role. The latter were of key importance for gold transfer. The author's diagram Au–TE_{1.3} shows the trend of increase in gold concentrations with the growth of the tetrad effect of fractionation of M-type REEs. Spatially, the area of distribution of syenites and monzonites is associated with numerous manifestations of gold, gold-bearing placers, as well as the Ulmen gold-copper-skarn deposit. In the latter, the richest mineralization tends to the syenite dikes.

Key words:

Alkaline magmatism, syenites, monzonites, petrology, zircon, tetrad effect of fractionation of rare earth elements, gold, Gorny Altai.

REFERENCES

- Jung S., Hauff F., Berndt J. Generation of a potassic to ultrapotassic alkaline complex in a syn-collisional setting through flat subduction: Constraints on magma sources and processes (Otjimbingwe alkaline complex, Damara orogen, Namibia). *Gondwana Research*, 2020, vol. 82, pp. 267–287. DOI: 10.1016/j.gr.2020.01.004
- Coulson I.M., Russell J.K., Dipple G.M. Origins of the Zippa Mountain pluton: a Late Triassic, arc-derived, ultrapotassic magma from the Canadian Cordillera. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 1999, vol. 36, no. 9, pp. 1415–1434. DOI: 10.1139/e99-045
- Yang J.-H., Wu F.-Y., Wilde S.A., Chen F., Liu X.-M., Xie L.-W. Petrogenesis of an Alkali Syenite-Granite-Rhyolite Suite in the Yanshan Fold and Thrust Belt, Eastern North China Craton: Geochronological, Geochemical and Nd-Sr-Hf Isotopic Evidence for Lithospheric Thinning. *Journal of Petrology*, 2008, vol. 49, no. 2, pp. 315–351. DOI: 10.1093/petrology/egm083
- Conticelli S., Guarnieri L., Farinelli A., Mattei M., Avanzinelli R., Bianchini G., Boari E., Tommasini S., Tiepolo M., Prelević D., Venturelli G. Trace elements and Sr–Nd–Pb isotopes of K-rich, shoshonitic, and calc-alkaline magmatism of the Western Mediterranean Region: Genesis of ultrapotassic to calc-alkaline magmatic associations in a post-collisional geodynamic setting. *Lithos*, 2009, vol. 107, no. 1–2, pp. 68–92. DOI: 10.1016/j.lithos.2008.07.016
- Yang J.-H., Sun J.-F., Zhang M., Wu F.-Y., Wilde S.A. Petrogenesis of silica-saturated and silica-undersaturated syenites in the northern North China Craton related to post-collisional and in-

- traplate extension. *Chemical Geology*, 2012, vol. 328, pp. 149–167. DOI: 10.1016/j.chemgeo.2011.09.011
6. Bonin B., Azzouni-Sekkal A., Bussy F., Ferrag S. Alkali-calcic and alkaline post-orogenic (PO) granite magmatism: petrologic constraints and geodynamic settings. *Lithos*, 1998, vol. 45, no. 1–4, pp. 45–70. DOI: 10.1016/S0024-4937(98)00025-5
 7. Sylvester P.J. Post-collisional alkaline granites. *The Journal of Geology*, 1989, vol. 97, no. 3, pp. 261–280. DOI: 10.1086/629302
 8. Whalen J.B., Currie K.L., Chappell B.W. A-type granites: geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1987, vol. 95, pp. 407–419. DOI: 10.1007/BF00402202
 9. Zhang Z., Qin J., Lai S., Long X., Ju Y., Wang X., Zhu Y., Zhang F. Origin of Late Permian syenite and gabbro from the Panxi rift, SW China: the fractionation process of mafic magma in the inner zone of the Emeishan mantle plume. *Lithos*, 2019, vol. 346–347, Article 105160. DOI: 10.1016/j.lithos.2019.105160
 10. Padilha D.F., Bitencourt M.F., Nardi L.V.S., Florisbal L.M., Reis C., Geraldes M., Almeida B.S. Sources and settings of Ediacaran post-collisional syenite-monzonite-diorite shoshonitic magmatism from southernmost Brazil. *Lithos*, 2019, vol. 344–345, pp. 482–503. DOI: 10.1016/j.lithos.2019.06.004
 11. Yan X., Jiang Sh.-Y. Petrogenesis and tectonic implications of Early Cretaceous shoshonitic syenites in the northern Wuyi Mt Range, Southeast China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2019, vol. 180, article 103877. DOI: 10.1016/j.jseas.2019.103877
 12. Schaarschmidt A., Klemd R., Regelous M., Voudouris P.C., Melfos V., Haase K.M. The formation of shoshonitic magma and its relationship to porphyry-type mineralisation: the Maronia pluton in NE Greece. *Lithos*, 2021, vol. 380–381, Article 105911. DOI: 10.1016/j.lithos.2020.105911
 13. Zhang M., Wang C., Zhang Q., Qin Y., Shen J., Hu X., Zhou G., Li S. Temporal-spatial analysis of alkaline rocks based on GEOROC. *Applied Geochemistry*, 2021, vol. 124, Article 104853. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2020.104853
 14. Ke S., Teng F.-Z., Li S.-G., Gao T., Liu S.-A., He Y., Mo X. Mg, Sr, and O isotope geochemistry of syenites from northwest Xinjiang, China: tracing carbonate recycling during Tethyan oceanic subduction. *Chemical Geology*, 2016, vol. 437, pp. 109–119. DOI: 10.1016/j.chemgeo.2016.05.002
 15. Litvinovsky B.A., Jahn B.M., Eyal M. Mantle-derived sources of syenites from the A-type igneous suites – new approach to the provenance of alkaline silicic magmas. *Lithos*, 2015, vol. 232, pp. 242–265. DOI: 10.1016/j.lithos.2015.06.008
 16. Zhu Y.-S., Yang J.-H., Sun J.-F., Zhang J.-H., Wu F.-Y. Petrogenesis of coeval silica-saturated and silica-undersaturated alkaline rocks: mineralogical and geochemical evidence from the Saima alkaline complex, NE China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2016, vol. 117, pp. 184–207. DOI: 10.1016/j.jseas.2015.12.014
 17. Yang J.-H., Chung S.-L., Wilde S.A., Wu F.-Y., Chu M.-F., Lo C.-H., Fan H.-R. Petrogenesis of post-orogenic syenites in the Sulu Orogenic Belt, East China: geochronological, geochemical and Nd–Sr isotopic evidence. *Chemical Geology*, 2005, vol. 214, no. 1–2, pp. 99–125. DOI: 10.1016/j.chemgeo.2004.08.053
 18. Lynch D.J., Musselman T.E., Gutmann J.T., Patchett P.J. Isotopic evidence for the origin of Cenozoic volcanic rocks in the Pinacate volcanic field, northwestern Mexico. *Lithos*, 1993, vol. 29, no. 3–4, pp. 295–302. DOI: 10.1016/0024-4937(93)90023-6
 19. Müller D., Franz L., Herzig P.M., Hunt S. Potassic igneous rocks from the vicinity of epithermal gold mineralization, Lihir Island, Papua New Guinea. *Lithos*, 2001, vol. 57, no. 2–3, pp. 163–186. DOI: 10.1016/S0024-4937(01)00035-4
 20. Soloviev S.G., Kryazhev S.G., Shapovalenko V.N., Collins G.S., Dvurechenskaya S.S., Bukhanova D.S., Ezhov A.I., Voskresensky K.I. The Kirganik alkalic porphyry Cu–Au prospect in Kamchatka, Eastern Russia: a shoshonite-related, silica-undersaturated system in a Late Cretaceous island arc setting. *Ore Geology Reviews*, 2021, vol. 128, Article 103893. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2020.103893
 21. Fan W., Jiang N., Hu J., Liu D., Zhao L., Li T. A metasomatized ¹⁸O-rich veined lithospheric mantle source for ultrapotassic magmas. *Lithos*, 2021, vol. 382–383, Article 105964. DOI: 10.1016/j.lithos.2020.105964
 22. Dai F.-Q., Zhao Z.-F., Zheng Y.-F. Partial melting of the orogenic lower crust: Geochemical insights from post-collisional alkaline volcanics in the Dabie orogen. *Chemical Geology*, 2017, vol. 454, pp. 25–43. DOI: 10.1016/j.chemgeo.2017.02.022
 23. Zhu K.-Y., Li Z.-X., Xu X.-S., Wilde S.A. Late Triassic melting of a thickened crust in southeastern China: evidence for flat-slab subduction of the Paleo-Pacific plate. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2013, vol. 74, pp. 265–279. DOI: 10.1016/j.jseas.2013.01.010
 24. Huang W.-L., Wyllie P.J. Melting reactions in the system NaAlSi₃O₈–KAlSi₃O₈–SiO₂ to 35 kilobars, dry and with excess water. *The Journal of Geology*, 1975, vol. 83, no. 6, pp. 737–748. DOI: 10.1086/628165
 25. Oliveira de A.L., Santos dos A.C., Nogueira C.C., Maia T.M., Geraldes M.C. Green core clinopyroxenes from Martin Vaz Archipelago Plio-Pleistocene alkaline rocks, South Atlantic Ocean, Brazil: A magma mixing and polybaric crystallization record. *Journal of South American Earth Sciences*, 2021, vol. 105, Article 102951. DOI: 10.1016/j.jsames.2020.102951
 26. Liu D., Zhao Z., DePaolo D.J., Zhu D.-C., Meng F.-Y., Shi Q., Wang Q. Potassic volcanic rocks and adakitic intrusions in southern Tibet: Insights into mantle-crust interaction and mass transfer from Indian plate. *Lithos*, 2017, vol. 268–271, pp. 48–64. DOI: 10.1016/j.lithos.2016.10.034
 27. Rukhlov A.S., Blinova A.I., Pawlowicz J.G. Geochemistry, mineralogy and petrology of the Eocene potassic magmatism from the Milk River area, southern Alberta, and Sweet Grass Hills, northern Montana. *Chemical Geology*, 2013, vol. 353, pp. 280–302. DOI: 10.1016/j.chemgeo.2012.10.024
 28. Dostal J., Shellnutt J.G., Church B.N. Petrogenesis of an Eocene syenitic intrusion from south-central British Columbia: Evidence for increasing influence of cratonic Laurentia on alkaline magmatism of western North America. *Lithos*, 2019, vol. 332–333, pp. 67–82. DOI: 10.1016/j.lithos.2019.01.023
 29. Dvornik G.P., Ugryumov A.N., Balahonov V.S. Metasomatitnyy i zolotodzhasperoidnoye orudneniye v kontaktoy zone Anomalnogo shchelochnogo massiva s vmeschayushchimi karbonatnymi porodami [Metasomatites and gold-jasperoid mineralization in the contact zone of the Anomalous alkaline massif with host carbonate rocks]. *Izvestiia Uralskogo gosudarstvennogo gor'nogo universiteta. Seriya: Geologiya i geofizika*, 2003, no. 18, pp. 105–109.
 30. Gusev A.I. Gold-bearing alkaline igneous complexes. *Advances in current natural sciences*, 2012, no. 9, pp. 47–52. In Rus.
 31. Hou Z., Xie Y., Xu W., Li Y., Zhu X., Khin Z., Beaudoin G., Rui Z., Huang W., Luobo C. Yulong Deposit, Eastern Tibet: A High-Sulfidation Cu–Au Porphyry Copper Deposit in the Eastern Indo-Asian Collision Zone. *International Geology Review*, 2007, vol. 49, no. 3, pp. 235–258. DOI: 10.2747/0020-6814.49.3.235
 32. Li H., Li J.-W., Algeo T.J., Wu J.-H., Cisse M. Zircon indicators of fluid sources and ore genesis in a multi-stage hydrothermal system: The Dongping Au deposit in North China. *Lithos*, 2018, vol. 314–315, pp. 463–478. DOI: 10.1016/j.lithos.2018.06.025
 33. Bao Z., Li C., Zhao Z. Metallogeny of the syenite-related Dongping gold deposit in the northern part of the North China Craton: a review and synthesis. *Ore Geology Reviews*, 2016, vol. 73, P. 2, pp. 198–210. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2015.04.002
 34. Shokalskii S.P., Babin G.A., Vladimirov A.G., Gusev N.I., Tokarev V.N., Zybin V.A., Dubskiy V.S., Murzin O.V., Krivchikov V.A., Kruk N.N., Rudnev S.N., Fedoseev G.S., Titov A.V., Sergeev V.P., Likhachev N.N., Mamlin A.N., Kotelnikov E.I., Kuznetsov S.A., Zeyfert L.L., Yashin V.D., Noskov Yu.S., Uvarov A.N., Fedak S.I., Gusev A.I., Vystavnov S.A. *Korrelatsiya magmaticheskikh i metamorficheskikh kompleksov zapadnoy chasti Altae-Sayanskoy skladchatoy oblasti* [Correlation of magmatic and metamorphic complexes in the western part of the Altai-Sayan fold area]. Novosibirsk, SO RAN Publ., 2000. 187 p.
 35. Gusev A.I., Tabakaeva E.M. *Magmatizm i metallogeniya Salaira* [Magmatism and metallogeny of Salair]. Biysk, AGGPU im. V.M. Shukshina, 2017. 182 p.
 36. Middlemost E.A.K. Naming materials in the magma/igneous rock system. *Earth-Science Reviews*, 1994, vol. 37, no. 3–4, pp. 215–224. DOI: 10.1016/0012-8252(94)90029-9
 37. Wright J.B. A simple alkalinity ratio and its application to questions of non-orogenic granite genesis. *Geological Magazine*, 1969, vol. 106, no. 4, pp. 370–384. DOI: 10.1017/S0016756800058222
 38. Patiño Douce A.E. What do experiments tell us about the relative contributions of crust and mantle to the origin of granitic magmas?

- Geological Society. Special Publications*, 1999, vol. 168, pp. 55–75. DOI: 10.1144/GSL.SP.1999.168.01.05
39. Irber W. The lanthanide tetrad effect and its correlation with K/Rb, Eu/Eu*, Sr/Eu, Y/Ho, and Zr/Hf of evolving peraluminous granite suites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1999, vol. 63, no. 3–4, pp. 489–508. DOI: 10.1016/S0016-7037(99)00027-7
 40. Anders E., Grevesse N. Abundances of the elements: meteoritic and solar. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1989, vol. 53, no. 1, pp. 197–214. DOI: 10.1016/0016-7037(89)90286-X
 41. Gusev A.I., Gusev N.I., Odintsev A.V. Geokhimiya, petrologiya i genezis ulmenskogo sienit-piroksenit-gabbrovogo kompleksa Severnogo Altaya [Geochemistry, petrology, and genesis of the Ulmen syenite-pyroxenite-gabbro complex of Northern Altai]. *Prirodnye resursy Gornogo Altaya: geologiya, geofizika, ekologiya, mineralnye, vodnye i lesnye resursy Altaya*, 2019, no. 1–2, pp. 29–40.
 42. Peccerillo A., Taylor S.R. Rare earth elements in East Carpathian volcanic rocks. *Earth and Planetary Science Letters*, 1976, vol. 32, no. 2, pp. 121–126. DOI: 10.1016/0012-821X(76)90050-9
 43. Rudnick R.L., Gao S. Composition of the continental crust. In R. Rudnick (Ed.), *Treatise on Geochemistry, Vol. 3: the Crust*. Amsterdam, Elsevier, 2003. pp. 1–64. DOI: 10.1016/B0-08-043751-6/03016-4
 44. Frost C.D., Frost B.R. Reduced rapakivi-type granites: the tholeiite connection. *Geology*, 1997, vol. 25, no. 7, pp. 647–650. DOI: 10.1130/0091-7613(1997)025<0647:RRTGTT>2.3.CO;2
 45. Zhao Z., Qi L., Huang Z.L., Yan Z.F., Xu C. Trace elements and Sr-Nd isotopic geochemistry and genesis of Jijie alkaline-ultramafic rocks, southern part of Panxi rift. *Acta Petrologica Sinica*, 2012, no. 6, pp. 1915–1927.
 46. Ewart A. A review of the mineralogy and chemistry of Tertiary-Recent dacitic, latitic, rhyolitic, and related salic volcanic rocks. *Trondjemites, Dacites, and Related Rocks*. Ed. by F. Barker. Amsterdam, Elsevier, 1979. pp. 13–121.
 47. Ewart A. The mineralogy and petrology of Tertiary – recent orogenic volcanic rocks: with special reference to the andesitic-basaltic compositional range. *Andesites: Orogenic Andesites and Related Rocks*. Ed. by R.S. Thorpe. Chichester, New York, Brisbane, Toronto, Singapore, John Wiley and Sons, 1982. pp. 25–95.
 48. Vinogradov A.P. Srednee sodержanie khimicheskikh elementov v gornykh porodakh [Average content of chemical elements in rocks]. *Geochemistry International*, 1962, no. 7, pp. 555–571.
 49. Wasson J.T., Kallemeyn G.W. Compositions of chondrites. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 1988, vol. 325, no. 1587, pp. 535–544. DOI: 10.1098/rsta.1988.0066

Received: 6 January 2021.

Information about the authors

Anatoly I. Gusev, Dr. Sc., professor, Shukshin Altai State Humanities Pedagogical University.

Evgeniya M. Tabakaeva, Cand. Sc., associate professor, Altai State University.

УДК 549.514.51

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МОЛОЧНО-БЕЛОГО КВАРЦА НОВОТРОИЦКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ВЫСОКОЧИСТОГО КВАРЦА, ЮЖНЫЙ УРАЛ

Корекина Мария Александровна,
maria@mineralogy.ru

Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН,
Россия, 456317, г. Миасс, территория Ильменского заповедника.

Актуальность. В связи с истощением запасов кварцевых месторождений прозрачного и полупрозрачного гранулированного кварца, являющихся традиционными источниками для получения высокочистого кварца (HPQ) для нужд высокотехнологичных отраслей производства, актуальной является оценка возможности использования для этих целей ранее не востребованных месторождений молочно-белого кварца.

Цель. На основании изучения микроэлементного состава исходных и глубокообогащенных проб молочно-белого кварца разных генетических типов Новотроицкого месторождения выполнить оценку возможности их использования для получения высокочистого кварца (HPQ).

Методы. Оценка перспективности кварцевого сырья дана на основе детального изучения петрографических особенностей и микроэлементного состава молочно-белого кварца методом ICP-OES спектроскопии.

Результаты. Молочно-белый кварц месторождения крупно-гигантозернистый, интенсивно деформированный, разбит системой трещин, с резкими контактами с вмещающими чередующимися слюдистыми сланцами и кварцитами. В центральной части крупно-гигантозернистый кварц блокованный и разлистованный. В приконтактной части кварц более минерализован, рекристаллизован, с содержанием новообразованных зерен в разных генетических типах от 3 до 50 %. Новообразованные зерна локализируются по полосам деформации, не содержат минеральных и флюидных включений и характеризуются высокой степенью чистоты. Во всех генетических типах, за исключением рекристаллизованного кварца с содержанием новообразованных зерен ~ 50 %, установлены высокие концентрации элементов-примесей, суммарно превышающие предельно допустимые для HPQ кварца. Это связано с наличием большого количества флюидных включений и трудностью их выделения из зерен кварца, а также сложностью удаления минеральных сростков с кварцем. Для получения высокочистого кварца пригоден интенсивно рекристаллизованный кварц с суммарным содержанием новообразованных зерен >50 % и элементов-примесей менее 50 ppm.

Ключевые слова:

Молочно-белый кварц, генетический тип, ICP-OES спектроскопия, высокочистый кварц (high-purity quartz – HPQ), элементы-примеси, флюидные включения.

Введение

Высокочистый кварц (High Purity Quartz – HPQ) является промышленно значимым продуктом и в силу своих физико-химических и технологических свойств широко используется для нужд высокотехнологичных, в том числе критических отраслей производства, к которым относятся оптоволоконная, полупроводниковая, светотехническая промышленность [1]. В настоящее время источниками для получения высокочистых кварцевых концентратов являются месторождения гранулированного, полупрозрачного и прозрачного жильного кварца [2, 3]. Их активная разработка началась в конце прошлого века, и к настоящему времени основная их часть практически полностью отработана. Наиболее распространенные на ряде месторождений жилы молочно-белого кварца менее востребованы в силу сложности их обогащения [4]. Основная сложность заключается в отсутствии возможности получения из молочно-белого кварца высокочистых кварцевых концентратов с суммарным содержанием примесей <50 ppm. Однако в связи с растущим спросом высокотехнологичных отраслей промышленности на высокочистый кварц возникает необходимость поиска новых перспективных кварцевых объектов для его получения. Основным критерием чистоты природного кварца является наличие в нем элементов-примесей,

входящих в состав минеральных и флюидных включений, а также в кристаллическую решетку самого кварца и устанавливающих предел обогащения кварцевой крупки [5, 6]. Для оценки содержания микроэлементного состава существует ряд методов, позволяющих получать информацию даже при очень низких концентрациях примесей, на уровне сотых ppm. К таким высокочувствительным методам относится ICP-OES спектроскопия с индуктивно связанной плазмой, позволяющая определять в образцах концентрации рассеянных элементов с чувствительностью до 0,001 ppm [7].

Необходимо отметить, что жилы молочно-белого кварца неоднородны по своему строению и состоят из кварца различных генетических типов. Каждый генетический тип отличается степенью наложения вторичных процессов, таких как разлистование, блокование, рекристаллизация, и обладает своей историей химического и механического формирования. Цель настоящей работы – на основании изучения микроэлементного состава исходных и глубокообогащенных проб молочно-белого кварца разных генетических типов оценить возможность их использования для получения HPQ. В статье рассмотрена типичная жила молочно-белого кварца Новотроицкого месторождения, являющегося одним из крупнейших объектов Сакмарской кварценозной провинции.

Геологическая характеристика месторождения

Новотроицкое месторождение гранулированного кварца входит в состав Сакмарской кварценовой провинции и расположено в 6 км от деревни Сабырово, на территории Зилаирского района (Башкортостан). Месторождение было открыто в 1984 г. геологами Центрально-Уральской геологоразведочной экспедиции ПО «Уралкварцсамоцветы» при проведении ревизионных маршрутов.

Сакмарский кварценовый район расположен в южной части Центрально-Уральского антиклинорного поднятия. Непосредственно Новотроицкое месторождение локализуется в пределах Уралтауского мегантиклинория, в строении которого выделяют два структурных этажа: верхнепротерозойский и мезокайнозойский. Верхнепротерозойские образования подразделяются на два комплекса: нижний – максютовский и верхний – суваянский [8, 9].

Все кварцевые жилы Сакмарского района приурочены к максютовскому метаморфическому комплексу, тяготеющему к Главному Уральскому разлому (рис. 1, а). Породы комплекса претерпели несколько стадий метаморфизма с преобразованием исходных пород в сланцы разного состава. Жилы молочно-

белого кварца являются жилами выполнения и распространены практически во всех литологических разностях пород, преобладая в породах караклинской свиты. Породы свиты представлены чередованием темно-окрашенных графит-мусковит-кварцевых сланцев и графитовых кварцитов с мусковит-кварцевыми сланцами [10, 11].

Жилы молочно-белого кварца, как правило, небольшие по размерам, мощностью от 7 до 50 м. Нами детально изучена типичная жила молочно-белого кварца, расположенная на левом берегу реки Сакмара, в 3 км северо-восточнее деревни Верхнегалеево (52°9'11.50"С; 57°51'58.20"В). Длина жилы по простиранию 850 м, максимальная видимая мощностью до 25 м. Вмещающие породы представлены чередованием светло-серых мелко-среднезернистых кварцитов и светло-серых полосчатых графит-кварцево-сланцев. Контакт кварцевой жилы с вмещающими породами четкий. Жила разбита серией разнонаправленных трещин.

Образцы кварца отобраны начиная с южного выклинивания жилы из ее центральной части и на контакте с вмещающими породами с интервалом ~ 5–50 м из видимых выходов (рис. 1, б).

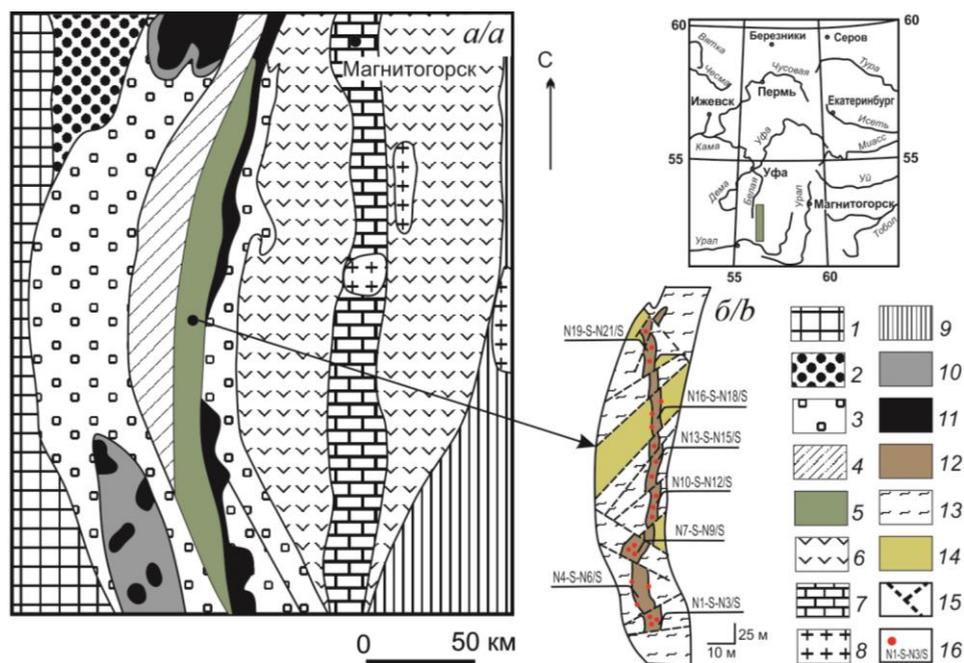


Рис. 1. Положение Новотроицкого месторождения на геологической схеме Южного Урала (а) [12], схема кварцевой жилы (б), а: 1 – отложения восточной части Восточно-Европейской платформы; 2 – рифейские отложения Башкирского мегантиклинория; 3 – отложения Зилаирского синклинория; 4 – отложения суваянского комплекса; 5 – отложения максютовского комплекса; 6 – вулканогенно-осадочные отложения Магнитогорского синклинория; 7 – карбонатные отложения Магнитогорского синклинория; 8 – гранитные массивы; 9 – отложения Мугоджарского и Ильменского блоков; 10 – отложения Межкраклинской и Сакмарской зон; 11 – гипербазиты; б: 12 – кварцевая жила; 13 – мелко-среднезернистые кварциты; 14 – графит-кварцево-сланцевые сланцы; 15 – разломы; 16 – точки отбора образцов

Fig. 1. Position of Novotroitskoe deposit in geological scheme of South Urals (a) [12], quartz vein (b). a: 1 – deposits of the eastern part of the East European Platform, undivided; 2 – Riphean deposits of the Bashkirian anticlinorium; 3 – deposits of the Zilair synclinorium; 4 – deposits of the Suvanyak Complex; 5 – deposits of the Maksyutov Complex; 6 – volcanosedimentary deposits of the Magnitogorsk synclinorium; 7 – carbonate deposits of the Magnitogorsk synclinorium; 8 – granite massifs; 9 – deposits of the Mugodzhary and Ilmeny blocks; 10 – deposits of the Mezhraklin and Sakmara zones, undivided; 11 – ultrabasic rocks; b: 12 – quartz vein; 13 – fine-medium-grained quartzites; 14 – graphite-quartz-mica slate; 15 – fault; 16 – sampling points

Методы исследования

Изучение петрографических особенностей кварца в шлифах проведены на оптическом микроскопе Axiolab (Carl Zeiss).

Методом ICP-OES установлены концентрации элементов-примесей в исходной и глубокообогащенной кварцевой крупке на оптико-эмиссионном спектрометре Varian-720-ES с индуктивно связанной плазмой. Пробоподготовка заключалась в растворении кварцевой крупки массой 0.1 г в 3 мл концентрированной фтористоводородной кислоты квалификации ос.ч. с дальнейшим ее испарением. Полученный осадок растворялся в 10 мл деионизованной воды.

В процессе глубокого обогащения образцов был проведен ряд последовательных этапов очистки, позволяющих максимально удалить минеральные и флюидные включения из кварца. На первом этапе проведено дробление кусков кварца вручную и просев на ситах до фракции $-0,315+0,1$, затем для извлечения электромагнитных примесей из полученной крупки выполнялась полиградиентная электромагнитная сепарация на сепараторе ЭВС-10/05 производства Механобртехника, г. Санкт-Петербург. Последующая СВЧД декрипитация позволила удалить из межзернового пространства, трещин и частично из объема зерна основную часть флюидных включений. С использованием агломерационного способа очистки из крупки были выделены минеральные включения. Завершающим этапом процесса обогащения являлась кислотная обработка крупки в смеси HCl и HF кислот. На данном этапе были удалены поверхностные загрязнения кварцевых зерен и минеральные включения, не удаленные на предыдущих этапах. Эффективность данной схемы обогащения показана на примере месторождений гранулированного кварца Уфалейского комплекса [3].

Результаты исследований и их обсуждение

Образцы (N1/S-N3/S) с южного выклинивания жилы представлены крупнозернистым трещиноватым и блокованным молочно-белым кварцем. В кварце диагностируются дендриты марганца, образующие скопления до 30 мкм, единичные чешуйки мусковита и охры железа. В шлифах это неравномернозернистый, интенсивно деформированный кварц с псевдопорфиробластовой структурой и основной микрогранобластовой тканью. Порфиробласты преимущественно прямоугольной формы, местами ромбоидальной. Кварцевые зерна овальной и округлой формы, с зубчатыми и ступенчатыми границами, размером до 4–5 мм (рис. 2, а). Флюидные включения, составляющие от 5 до 10 % на 1 см² шлифа, размером от 1–2 до 7 мкм, расположены хаотично по всему объему зерен. По зонам деформации развивается новообразованный рекристаллизованный кварц, образующий скопления зерен неправильной формы и цепочечные прослои. Он сложен зернами, размером 0,01...0,1 мм, не подвергнутыми деформации, без минеральных и флюидных включений. Новообразованный кварц составляет около 50 % объема площади шлифа (рис. 2, а).

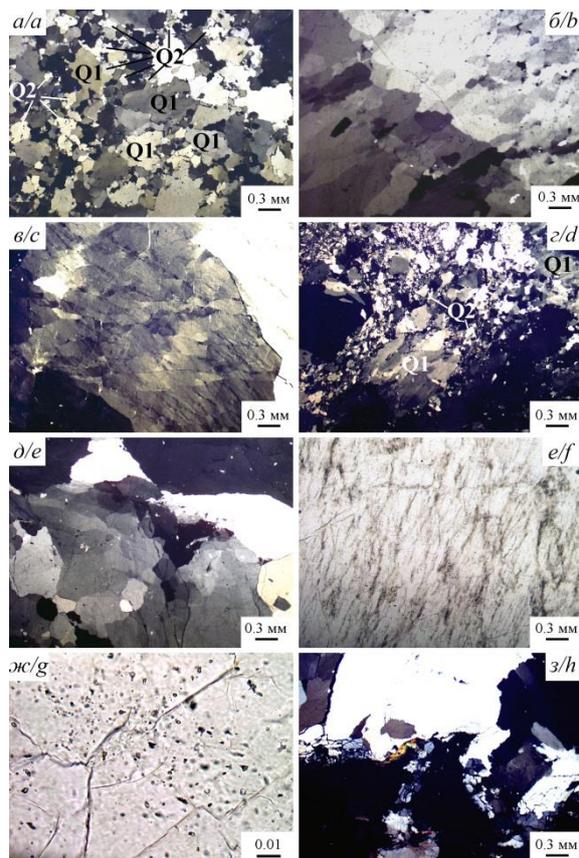


Рис. 2. Молочно-белый кварц: а) кварц первой (Q1) и второй (Q2) генераций; б) интенсивно деформированный кварц, блокованный с изгибами; в) блокованные зерна бразильских двойников, разориентированные вследствие хрупкой и пластической деформации; г) деформированные, блокованные зерна кварца первой генерации (Q1) и новообразованные перекристаллизованные зерна кварца второй генерации (Q2); д) деформированные зерна кварца; е) поверхность кварцевых зерен с трещинами, вдоль которых расположены флюидные включения; ж) цепочки и поля флюидных включений в зернах деформированного кварца; з) трещины и пустоты, заполненные гематитом и биотитом, а–д, з) с анализатором; е, ж) без анализатора

Fig. 2. Milky-white quartz: a) quartz of the first (Q1) and second (Q2) generation; b) intensely deformed quartz, blocked; c) blocked grains, blocked grains of quartz of the first generation (Q1) and newly formed recrystallized grains of quartz of the second generation (Q2); d) deformed quartz grains; e) crack with fluid inclusions; f) fluid inclusions in grains of deformed quartz; g) hematite and biotite, a–e, h) with the analyzer; f, g) without the analyzer

На контакте с кварцитами гигантозернистый молочно-белый кварц интенсивно деформирован, блокован, по трещинкам кварца развиты охры железа, диантит (N4/S-N6/S) (рис. 2, б). В шлифе кварцевый агрегат характеризуется неравномерно зернистой гетеробластовой структурой, катакlastической, местами шестоватой текстурой. В зернах, размером до 4–5 мм, удлиненной, близкой к изометричной формы, с зубча-

тыми границами, встречаются многочисленные флюидные включения. Размер флюидных включений 15...20 мкм. Включения, особенно мелкие, формируют цепочки, а крупные расположены хаотично. В участках с катакlastической текстурой зерна разного размера интенсивно деформированы. Пластическая деформация – волнистое погасание и изгибы. Местами по локальным трещинам возникает новообразованный рекристаллизованный кварц, размером до 0,05...0,1 мм, без флюидных включений и следов деформации. Он составляет около 3 % объема площади шлифа.

Образцы (N7/S-N9/S) из центральной части жилы представлены крупнозернистым кварцем, интенсивно деформированным, блоковым, с участками разлитованного водно-прозрачного кварца, размером до 1,5...2,0 см, по трещинам наблюдаются охры железа. В шлифе зерна кварцевого агрегата характеризуются гранобластовой структурой и катакlastической текстурой. Разлитование является результатом скольжения по границам бразильских двойников и в зернах отражено параллельными полосами, обеспечивающими макроскопически четкую пластинчатую отдельность [13]. В кварце наблюдаются результаты процессов деформации – разветвленные трещины. Из-за деформации блокование в кварце проявлено неотчетливо. Между пластинками бразильских двойников возникает разориентировка (рис. 2, в).

Хрупкая деформация вызывает образование трещин по двойниковым границам. Пластическая деформация также сопровождается хрупким разрушением на границе бразильских двойников. В зернах разлитованного кварца флюидные включения образуют ленточные поля и скопления неправильной формы, приуроченные к внутризерновым трещинам и местам пересечения трещин. Плотность флюидных включений варьирует от 10 до 15 %, размер менее 5 мкм.

На контакте с кварцитами (образцы N10/S-N12/S) кварц характеризуется неравномерно зернистой, псевдопорфиробластовой структурой. Зерна кварца 1–2 мм, с волнистым погасанием, зубчатыми границами, разделяются мелкозернистым агрегатом (0,1...0,5 мм) гранулированного кварца. Некоторые зерна блокованы, блоки деформированы локальными трещинами и проявлены нечетко. Пластическая деформация отражена во всех крупных зернах волнистым погасанием, системами тонких изгибов и в некоторых зернах следами сжатия. Отмечаются скрученные кварцевые зерна (рис. 2, г). Крупные зерна густо насыщены флюидными включениями, не превышающими 5 мкм. Плотность в разных зернах 10–15 % на 1 см² площади шлифа. Новообразованный кварц без следов деформации, не содержит флюидные и минеральные включения. Чешуйки слюды представлены биотитом и приурочены к трещинам, местами образуя скопления в ассоциации с гематитом или гематитом.

Участками кварцевая жила разбита на блоки ромбовидной формы пересекающимися трещинами с азимутом простирания 190–210° и 150–160°. Кварц в блоках характеризуется гигантозернистой структурой

(образцы N13/S-N15/S) (центральная часть жилы). В шлифах расположение зерен отражает действие тектонических процессов, вызвавших появление разнонаправленных трещин. Зерна интенсивно деформированы, часто развернуты в разных направлениях (рис. 2, д), блокованы. Блоки мелкие прямоугольной формы, часто деформированы локальными трещинами. В местах проявления изгибов блоки проявлены неотчетливо. Поверхность большей части зерен приобретает серовато-буроватый оттенок за счет многочисленных залеченных внутризерновых трещин, к которым приурочены флюидные включения (рис. 2, е). Они представлены в виде цепочек и полей, размером 1...5 мкм. В местах пересечения трещин возникают поля флюидных включений неправильной формы. Плотность 20–25 % в разных зернах на 1 см² площади шлифа.

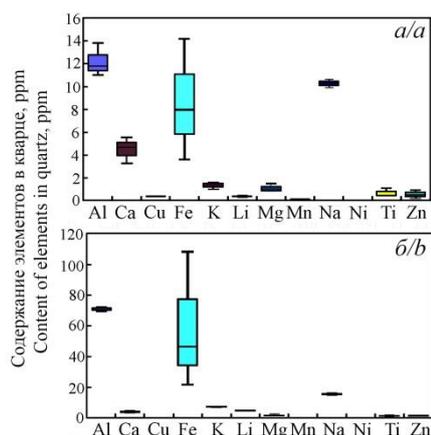
Контакт кварцевой жилы и вмещающих темно-серых биотит-хлорит-кварцевых сланцев резкий, линия контакта прямая. Образцы с контакта со сланцами – это крупнозернистый, интенсивно деформированный, рекристаллизованный, по трещинкам ожелезненный кварц, содержащий включения слюды и хлорита (образцы N16/S-N18/S). Крупные зерна размером до 2–3 мм, интенсивно деформированные, с внутризерновыми залеченными трещинами и флюидными включениями размером 1...5 мкм. Плотность флюидных включений до 10 % на 1 см² площади шлифа (рис. 2, ж). Пластическая деформация в шлифе отражена волнистым погасанием, блокованием. Мелкозернистый кварц с размером 0,01...0,03 мм имеет прямолинейные границы, однородное погасание, слагает прослой и составляет около 30 % объема площади шлифа, не содержит минеральных и флюидных включений. Минеральные включения в крупных зернах кварца: мусковит, графит, охры железа, диабантит.

На северном выклинивании жилы в кварце (образцы N19/S-N21/S) наблюдаются пустоты и каверны, заполненные хлоритом, гематитом или биотитом. Кварц имеет пятнистую окраску за счет пятен желтоватого или буроватого цвета. В шлифе кварцевый агрегат характеризуется средне-, крупнозернистой структурой, с зернами размером от 3–4 мм до 1 см. Наблюдаются результаты деформации кварца в виде залеченных трещин, вдоль которых присутствуют поля флюидных включений, размером 2–5, реже до 10 мкм. Их плотность составляет 5–10 % на 1 см² площади шлифа.

Пластическая деформация отражена отдельными изгибами и блокованием. Блоки мелкие, прямоугольные, местами проявлены неотчетливо из-за изгибов и деформации локальными трещинами. Местами по плоскостям деформации образуется мелкий мелкозернистый кварц (около 10 % объема шлифа), размером менее 0,01 мм, круглой формы с однородным погасанием. Пустоты в кварце выполнены хлоритом, гематитом, местами биотитом (рис. 2, з). Биотит образует скопления мелких пластинок размером 0,03...0,05 мм, по которым местами развивается хлорит. Гематит наблюдается в виде натечных пленок и мелких пластинчатых зерен менее 0,01 мм.

Основным критерием чистоты природного кварца является его микроэлементный состав. Кварц является высокочистым, если суммарное содержание основных элементов-примесей в нем не превышает 50 ppm [14]. Основными элементами-примесями являются Al, Ti, Fe, K, Na, Ca, Cu, Li, Mg, Mn, Sr и т. д. [3, 6, 15]. Они входят в состав кристаллической решетки кварца, а также флюидных и минеральных включений [6].

В структурную решетку кварца, замещая ионы Si^{4+} , входят ионы Al^{3+} , Ge^{4+} , Ti^{4+} , Fe^{3+} , и P^{5+} [15–18]. По данным ЭПР-спектроскопии содержание Al в структурной форме составляет от 10 до 30 % от объема общего Al.



Кроме того, Al широко распространен в минеральных включениях (слюды, полевые шпаты). Титан и железо часто встречаются в составе минеральных включений, таких как рутил и оксиды железа, но отсутствуют и как структурная примесь. Щелочные ионы Na и K, кроме минеральных примесей (слюды, полевые шпаты), широко распространены во флюидных включениях, часто встречающихся в молочно-белом кварце [14]. Ca, Mg и Mn входят в жидкую составляющую флюидных включений и встречаются в составе минеральных включений, таких как карбонаты, дендриты марганца, слюды [15, 19].

На рис. 3 показана диаграмма содержания основных элементов-примесей в исходной кварцевой крупке.

Рис. 3. Диаграмма распределения микроэлементного состава исходных проб молочно-белого кварца (а – рекристаллизованный кварц с содержанием новообразованных зерен более 50 %, б – блокированный кварц на контакте с вмещающими жилу кварцитами). Прямоугольники ограничены верхними максимальными и нижними минимальными значениями, линия в прямоугольниках – значения медианы

Fig. 3. Diagram of distribution of the trace element composition of the milky-white quartz original samples (a – recrystallized quartz with a content of newly formed grains ~50 %, b – blocked quartz in contact with the vein-containing quartzites). The rectangles are bounded by the upper maximum and the lower minimum values, the line in the rectangles – median values

Таблица. Элементы-примеси в глубокообогащенном молочно-белом кварце, ppm

Table. Impurity elements in deeply enriched milky-white quartz, ppm

| Элемент Element | Al | Ca | Cr | Cu | Fe | K | Li | Mg | Mn | Na | Ni | Ti | Zn | Сумма |
|--|--------|-------|-------|-------|--------|-------|------|------|-------|-------|-------|------|------|--------|
| Южное выклинивание жилы (~50 % новообразованных зерен)/Southern vein wedging (~50 % of newly formed grains) | | | | | | | | | | | | | | |
| N1/S | 11,81 | 5,53 | <п.о. | 0,42 | 8,00 | 1,48 | 0,38 | 0,91 | 0,12 | 10,62 | 0,03 | 0,43 | 0,49 | 40,22 |
| N2/S | 13,83 | 4,67 | | 0,41 | 14,21 | 1,57 | 0,41 | 1,52 | 0,15 | 10,30 | <п.о. | 1,11 | 0,92 | 49,1 |
| N3/S | 11,02 | 3,26 | | 0,37 | 3,64 | 1,00 | 0,35 | 0,85 | 0,08 | 9,96 | <п.о. | 0,48 | 0,27 | 31,28 |
| Контакт с кварцитами (~3 % новообразованных зерен)/Contact with quartzites (~3 % of newly formed grains) | | | | | | | | | | | | | | |
| N4/S | 72,09 | 3,28 | <п.о. | 0,45 | 108,90 | 6,86 | 4,94 | 0,94 | 0,45 | 15,03 | 0,01 | 0,76 | 1,24 | 214,95 |
| N5/S | 70,98 | 4,25 | | 0,31 | 46,48 | 7,21 | 5,00 | 2,27 | 0,22 | 15,63 | 0,06 | 1,31 | 1,33 | 155,05 |
| N6/S | 69,71 | 3,86 | | 0,23 | 21,63 | 7,14 | 4,89 | 0,99 | 0,16 | 15,42 | <п.о. | 0,70 | 1,14 | 125,87 |
| Центральная часть жилы (разлистованный кварц)/Vein central part (sheet quartz) | | | | | | | | | | | | | | |
| N7/S | 56,13 | 4,52 | 0,34 | 0,19 | 17,81 | 16,88 | 2,92 | 0,87 | 0,18 | 19,62 | 0,09 | 0,37 | 1,48 | 121,4 |
| N8/S | 60,01 | 7,85 | 1,14 | 0,22 | 10,83 | 17,13 | 3,01 | 0,99 | 0,24 | 20,93 | 0,61 | 1,19 | 1,49 | 125,64 |
| N9/S | 126,39 | 3,50 | 0,12 | 0,15 | 5,80 | 16,28 | 2,88 | 1,07 | 0,15 | 19,19 | <п.о. | 0,86 | 1,34 | 177,73 |
| Контакт с кварцитами (блокированный кварц)/Contact with quartzites (block quartz) | | | | | | | | | | | | | | |
| N10/S | 43,36 | 7,65 | <п.о. | 0,34 | 23,48 | 9,71 | 3,08 | 0,88 | 0,24 | 15,72 | 0,29 | 1,11 | 1,38 | 107,24 |
| N11/S | 42,48 | 8,17 | | 0,26 | 5,13 | 9,57 | 2,98 | 0,91 | 0,13 | 15,15 | <п.о. | 1,01 | 1,01 | 86,8 |
| N12/S | 137,57 | 28,12 | | 0,26 | 1,81 | 9,97 | 3,13 | 1,54 | 0,13 | 16,20 | <п.о. | 1,16 | 0,96 | 200,85 |
| Центральная часть жилы (блокированный кварц)/Vein central part (block quartz) | | | | | | | | | | | | | | |
| N13/S | 29,24 | 4,90 | <п.о. | 0,18 | 10,40 | 9,38 | 1,74 | 1,03 | 0,17 | 11,63 | 0,18 | 0,57 | 1,24 | 70,66 |
| N14/S | 28,68 | 3,32 | | 0,13 | 0,96 | 8,49 | 1,72 | 0,55 | 0,13 | 11,31 | <п.о. | 0,67 | 0,77 | 56,73 |
| N15/S | 28,02 | 3,76 | | 0,15 | 2,17 | 8,60 | 1,72 | 0,58 | 0,14 | 11,34 | <п.о. | 0,39 | 0,93 | 57,8 |
| Контакт с биотит-хлорит-кварцевыми сланцами/Contact with biotite-chlorite-quartz slates | | | | | | | | | | | | | | |
| N16/S | 19,58 | 3,42 | 0,47 | 0,26 | 13,05 | 10,37 | 0,62 | 2,30 | 0,37 | 9,42 | 0,22 | 1,51 | 0,90 | 62,49 |
| N17/S | 20,53 | 2,44 | 3,86 | 0,30 | 28,46 | 10,41 | 0,63 | 2,34 | 0,54 | 9,34 | 0,95 | 2,79 | 0,72 | 83,31 |
| N18/S | 20,54 | 2,93 | <п.о. | 0,70 | 9,34 | 10,72 | 1,51 | 2,55 | 0,36 | 9,69 | 0,06 | 3,14 | 0,65 | 62,19 |
| Северное выклинивание жилы (каверны и пустоты, ~10 % новообразованных зерен) Northern vein wedging (cavities and voids, ~10 % of newly formed grains) | | | | | | | | | | | | | | |
| N19/S | 18,92 | 2,81 | <п.о. | 0,22 | 13,12 | 4,87 | 0,76 | 4,94 | 0,34 | 10,24 | 0,07 | 3,50 | 1,13 | 60,92 |
| N20/S | 17,31 | 2,52 | | 0,18 | 9,87 | 4,56 | 0,77 | 2,66 | 0,32 | 10,04 | 0,03 | 1,49 | 0,93 | 50,68 |
| N21/S | 17,39 | 2,95 | | 0,22 | 12,53 | 4,80 | 0,83 | 2,75 | 0,32 | 10,11 | <п.о. | 0,67 | 1,05 | 53,62 |
| JOTA-srd «Unimin» | 14,0 | 0,6 | 0,06 | 0,028 | 0,3 | 0,7 | 0,5 | 0,04 | 0,039 | 1,0 | 0,001 | 1,2 | 0,01 | 18,478 |

Примечание (Note): <п.о. – ниже предела обнаружения/lower the detection limit.

Суммарные значения микроэлементного состава в исходном кварце варьируют в зависимости от насыщенности образцов минеральными и флюидными включениями. Необходимо отметить, что рекристаллизованный, блокованный и разлистованный кварц имеют разный микроэлементный состав, что определяет их как разные поколения деформированного кварца. При этом во всех образцах на долю железа, алюминия и щелочей приходится больше половины суммы всех элементов-примесей. В рекристаллизованных образцах с содержанием новообразованных зерен ~50 % значения микроэлементного состава ниже, чем в остальных образцах (рис. 3, а). Более высокие показатели характерны для кварца с контакта со слюдястыми сланцами и кварцитами (рис. 3, б). В образцах наблюдаются высокие концентрации и значительный разброс по содержанию железа. Высокие содержания железа установлены в обогащенных образцах, что, возможно, связано с тем, что значительная его часть является техногенной примесью и высокие концентрации обусловлены неполным удалением при проведении обогащения, а также интенсивным ожелезнением самого кварца и наличием минеральных включений (диабантит), образующих сростки с кварцем.

В таблице показаны содержания основных элементов примесей в глубокообогащенной кварцевой крупке по данным ICP-OES спектроскопии. Для сопоставления приведены данные кварца марки IOTA-std (Unimin) [20].

После проведения глубокого обогащения в блокованном, разлистованном и в незначительной степени рекристаллизованном кварце (до 30 %) наблюдаются высокие содержания по всем элементам. В интенсивно рекристаллизованном кварце, с долей новообразованных «чистых» зерен до 50 %, процесс обогащения проходит лучше и сумма элементов-примесей составляет менее 50 ppm (таблица).

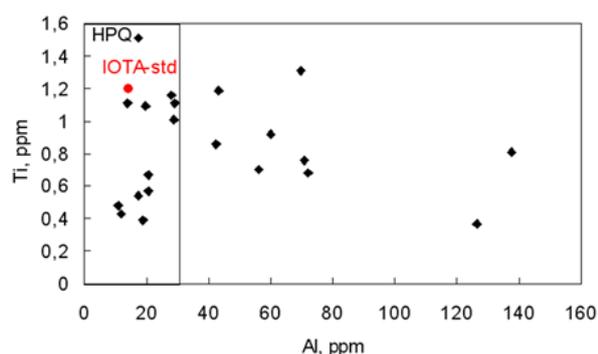


Рис. 4. График зависимости Al от Ti в молочно-белом кварце, на диаграмме выделена зона HPQ, по [18]

Fig. 4. Al–Ti dependence in milky-white quartz, the diagram shows the HPQ zone, according to [18]

Из таблицы и рис. 4 видно, что содержание Ti во всех рекристаллизованных разностях не превышает значений 1,6 ppm, т. е. точки на диаграмме располо-

жены в диапазоне кварца марки HPQ, в том числе и значения кварца IOTA-std. Следует отметить, что сумма основных элементов-примесей во всех образцах превышает 50 ppm (таблица), за исключением образцов N1/S, N2/S и N3/S, состоящих на ~50 % из новообразованных зерен, не содержащих минеральных и флюидных включений. По данным ЭПР-спектроскопии в молочно-белом кварце максютовского комплекса отсутствуют Ti-центры, таким образом, весь Ti является не структурным, а входит в состав минеральных включений, удаляемых в процессе обогащения, с этим связаны его низкие концентрации во всех генетических типах молочно-белого кварца.

Высокие содержания щелочных элементов обусловлены невозможностью удаления части мелких флюидных включений, расположенных в объеме кварцевых зерен [21].

На рис. 5 показана эффективность обогащения кварцевой крупки по основным элементам (Al, Fe, K, Na).

Из данных гистограмм можно сделать вывод о том, что в рекристаллизованных разностях все примеси удаляются наиболее эффективно, во время как в блокованном и в большей части рекристаллизованного кварца снижение значений незначительно. Это объясняется присутствием элементов-примесей в основном в составе жидкой фазы флюидных включений, широко распространенных в молочно-белом кварце, и минеральных примесей в объеме кварцевого зерна. Al, являющийся основной примесью в кварце, так же как и остальные примеси, наиболее эффективно удаляется в рекристаллизованных разностях. Это происходит в связи с его незначительным содержанием в структурной форме и преобладанием в составе минеральных включений. Содержание Al в обогащенных образцах, по данным ICP-OES спектроскопии, составляет 31,28...214,95 ppm, на долю структурного Al в молочно-белом кварце максютовского комплекса (по данным ЭПР спектроскопии) приходится 6,1...11,6 ppm, доля Al-ОН группировок (по данным ИК-спектроскопии) составляет 1,1...9,4 ppm. Таким образом, основная часть Al связана с минеральными включениями (слюды), образующими трудноудаляемые в процессе обогащения сростки с кварцем. Такая же ситуация с Fe, присутствующим в основном в минеральных включениях (магнетит, гематит, хлорит, охры железа). В связи с этим, не смотря на более низкие содержания элементов-примесей в необогащенных образцах разлистованного кварца, обогащается он значительно хуже, по сравнению с рекристаллизованными разностями.

Гистограммы щелочных элементов K и в большей степени Na показывают значительную роль флюидных включений при обогащении кварцевой крупки. На обеих гистограммах видно, что в блокованном и разлистованном кварце удаление Na и K малоэффективно вследствие сложности избавления от флюидных включений, являющихся основным источником их присутствия в кварце.

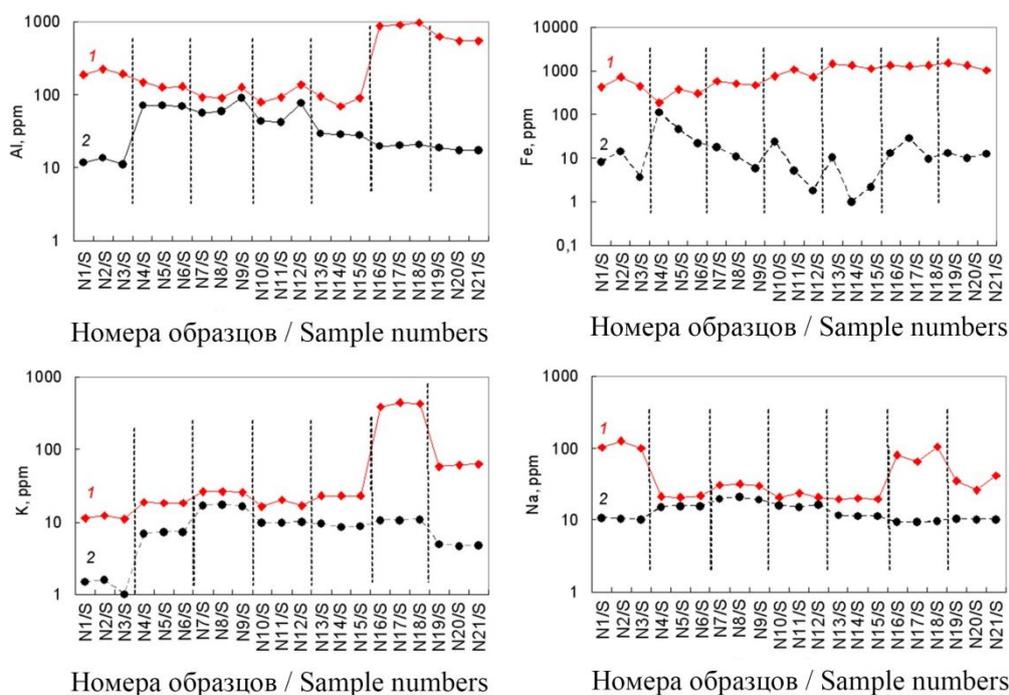


Рис. 5. Содержание элементов-примесей в исходном (1) и глубокообогащенном (2) кварце разных генетических групп по данным ICP-OES анализа

Fig. 5. Impurity elements in the original (1) and deep enriched (2) quartz of different genetic groups (ICP-OES)

Заключение

Изученная нами жила молочно-белого кварца представляет собой массивное, интенсивно деформированное тело, разбитое системой трещин с высоким содержанием флюидных и минеральных включений: слюды, графита, дендритов марганца, охр железа и т. д.

Образцы кварца, отобранные на контакте кварцитов и сланцев, в разной степени деформированы, отличаются повышенным содержанием минеральных примесей и имеют высокие значения по микроэлементному составу исходной кварцевой крупки. Кварц на северном окончании жилы содержит каверны и пустоты, заполненные минеральными включениями, в то время как кварц из центральной части жилы в большей степени разлитован и блокован, и оба этих типа кварца характеризуются более низкими содержаниями элементов-примесей.

Наложённые процессы метаморфизма привели к перекристаллизации исходного кварца с образованием мелкозернистого новообразованного. Степень рекристаллизации на жиле разная – от 3 до 50 %. Рекристаллизованный кварц распространён в основном в северном и южном выклинивании жилы и в приконтактовой части. В нем в процессе перекристаллизации

из мелких вновь образованных зерен удалились практически все минеральные и флюидные включения и сконцентрировались в межзерновом пространстве, что значительно упрощает процесс обогащения [3]. В связи с этим чем выше степень рекристаллизации кварца и выше количество новообразованных зерен, тем меньше концентрация элементов-примесей.

Кварц разных генетических типов имеет разный микроэлементный состав, что обусловлено наличием и расположением в кварце минеральных и флюидных включений. В блокованном, разлитованном и в незначительной степени рекристаллизованном кварце (до 30 %) даже после обогащения наблюдаются высокие содержания по всем элементам. В кварце рекристаллизованном до 50 % процесс обогащения проходит лучше и содержание элементов-примесей суммарно менее 50 ppm. Наиболее перспективным для получения кварцевой крупки с требуемыми параметрами чистоты является рекристаллизованный молочно-белый кварц с содержанием новообразованных зерен не менее 50 %.

Автор выражает благодарность Ларисе Яковлевне Кабановой за помощь при изучении петрографических особенностей кварца.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Market developments and industrial innovative applications of high purity quartz refines / K.I. Vatalis, G. Charalampides, S. Platias, N.P. Benetis // *Procedia Economics and Finance*. – 2014. – V. 14. – P. 624–633. DOI: org/10.1016/S2212-5671(14)00751-5.
- Геологическое строение и генезис кварцевых жил Уфалейского комплекса на примере жилы 2136 / В.Н. Анфилогов, Л.Я. Кабанова, М.А. Игуменцева, Н.К. Никандрова // *Доклады Академии наук*. – 2016. – Т. 466. – № 4. – С. 443–446.

- Кварц жилы № 175 Кыштымского месторождения гранулированного кварца (Южный Урал) как эталон для оценки качества кварцевого сырья / М.А. Игуменцева, В.Г. Кузьмин, В.Н. Анфилогов, Л.Я. Кабанова, В.М. Рыжков, М.В. Штенберг, Р.Т. Зайнуллина // *Разведка и охрана недр*. – 2018. – № 5. – С. 48–53.
- Геологическое строение, петрография и технологические характеристики кварца кварцевого месторождения «жила Толстиха» / В.Н. Анфилогов, Л.Я. Кабанова, М.А. Игуменцева, Р.Ш. Насыров, М.В. Штенберг, А.С. Лебедев, В.М. Рыжков, П.А. Ардышев // *Разведка и охрана недр*. – 2012. – № 12. – С. 12–16.

5. Ryzhkov V.M., Igumentseva M.A., Shtenberg M.V. Technology for quality assessment of quartz raw materials // *Minerals: Structure, Properties, Methods of Investigation*. Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences / Eds. S. Votyakov, D. Kiseleva, V. Grokhovsky, Y. Shchapova. – Cham: Springer, 2020. – P. 195–199.
6. Trace element compositions and defect structures of high-purity quartz from the Southern Ural region, Russia / J. Götze, Y. Pan, A. Müller, E.L. Kotova, D. Cerin. // *Minerals*. – 2017. – V. 7. – № 10. P. 189–207. DOI: 10.3390/min7100189.
7. Прецизионный (ICP-MS, LA-ICP-MS) анализ состава горных пород и минералов: методика и оценка точности результатов на примере раннедокембрийских мафитовых комплексов / С.А. Светов, А.В. Степанова, С.Ю. Чаженгина, Е.Н. Светова, З.П. Рыбникова, А.И. Михайлова, А.С. Парамонов, В.Л. Утицына, М.В. Эхова, В.С. Колодей // *Труды Карельского научного центра РАН*. – 2015. – № 7. – С. 54–73.
8. Arc-continent collision in the Southern Urals / D. Brown, P. Spadea, V. Puchkov, J. Alvarez-Marron, R. Herrington, A.P. Willner, R. Hertz, Y. Gorozhanina, C. Juhlin // *Earth-Science Reviews*. – 2006. – V. 79. – P. 261–287.
9. Mineral deposits of the Urals and links to geodynamic evolution / R.J. Herrington, V.V. Zaykov, V.V. Maslennikov, D. Brown, V.N. Puchkov // *Economic Geology*. – 2005. – V. 100. – № 5. – P. 1069–1095.
10. Сначев В.И. Геология, петрогеохимия и рудоносность углеродистых отложений южной части зоны Уралтау // *Вестник Академии наук РБ*. – 2016. – Т. 21. – № 2. – С. 65–72.
11. Паняк С.Г., Макаров А.Б., Страшненко Г.И. Особенности геологического строения и условий формирования Новотроицкого месторождения высокочистого кварца // *Известия Уральского государственного горного университета*. – 2001. – № 13. – С. 136–139.
12. Ковалев С.Г., Тимофеева Е.А., Пиндюрина Е.О. Геохимия эклогитов Максютковского комплекса (Южный Урал) и генетическая природа их протолитов // *Геохимия*. – 2015. – № 4. – С. 299–327.
13. Вергушков Г.Н. Разлифованный кварц с горы Хрустальной // *Зап. ВМО*. – 1946. – Т. 75. – № 4. – С. 257–264.
14. Müller A., Wanvik J.E., Ihlen P.M. Petrological and chemical characterisation of high-purity quartz deposits with examples from Norway // *Quartz: Deposits, Mineralogy and Analytics* / Eds. J. Götze, R. Möckel. – Heidelberg: Springer, 2012. – P. 71–73.
15. Исаев В.А. Структурные примеси в кварце. Ч. I. Обзор и анализ традиционных способов очистки кварца от структурных примесей // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2006. – № 9. – С. 11–23.
16. Weil J.A. A review of electron spin spectroscopy and its application to the study of paramagnetic defects in crystalline quartz // *Physics and Chemistry of Minerals*. – 1984. – V. 10. – № 4. – P. 149–165.
17. Weil J.A. A review of the EPR spectroscopy of the point defects in α -quartz: the decade 1982–1992 // *Physics and chemistry of SiO₂ and the Si-SiO₂ interface 2*. – New York: Plenum Press, 1993. – P. 131–144.
18. Trace element incorporation into quartz: a combined study by ICP-MS, electron spin resonance, cathodoluminescence, capillary ion analysis, and gas chromatography / J. Götze, M. Plotze, T. Graupner, D. Klaus, C.J. Bray // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 2004. – V. 68. – № 18. – P. 3741–3759. URL: <https://doi.org/10.1016/j.gca.2004.01.003> (дата обращения 15.06.2021).
19. Савичев А.Н., Красильников П.А. Статистическая характеристика элементов-примесей в особо чистом кварце уральского типа (Уфалейский кварцево-жильный район, Южный Урал) // *Минералогия*. – 2019. – Т. 5. – № 1. – С. 46–56.
20. Геологические и минералого-геохимические сведения о кварце с торговой маркой ЮТА (США, штат Северная Каролина). Возможности поиска его аналогов в России / Г.И. Крылова, Л.С. Скобель, А.А. Митрофанов, В.Г. Балакирев // *Уральский геологический журнал*. – 2003. – Т. 4. – № 34. – С. 81–122.
21. Реддер Э. Флюидные включения в минералах. – М.: Мир, 1987. – 637 с.

Поступила 23.06.2021 г.

Информация об авторе

Корекина М.А., кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник лаборатории минералогии и технологии кварцевого сырья Южно-Уральского федерального научного центра минералогии и геоэкологии УрО РАН.

UDC 549.514.51

ASSESSMENT OF POSSIBILITY OF USING MILKY-WHITE QUARTZ OF NOVOTROITSKOE DEPOSIT FOR OBTAINING HIGH-PURITY QUARTZ, SOUTH URALS

Maria A. Korekina,
maria@mineralogy.ru

South Urals Federal Research Center of Mineralogy and Geoecology of UB RAS,
territory of the Ilmeny State Reserve, Miass, 456317, Russia.

Relevance. Due to the depletion of reserves of quartz deposits of transparent and semi-transparent granular quartz, which are the traditional sources for obtaining high-purity quartz for the needs of high-tech industries, it is urgent to assess the possibility of using previously unclaimed milky-white quartz deposits for these purposes.

The aim of the research is to assess the possibility of using trace element composition of the initial and deep-enriched samples of milky-white quartz of different genetic types of the Novotroitskoe deposit for production of high-purity quartz based on their study.

Methods. The prospects are assessed on the basis of a detailed study of the petrographic features and trace element composition of milky-white quartz by ICP-OES spectroscopy.

Results. The milky-white quartz of the deposit is coarse-grained, intensely deformed, broken by a system of cracks, with sharp contacts with the host alternating mica shales and quartzites. In the central part, large-giant-grained quartz is blocky and sheet. In the near-contact part, quartz is more mineralized, recrystallized, with the content of newly formed grains in different genetic types from 3 to 50 %. The newly formed grains are formed along the deformation bands, do not contain mineral and fluid inclusions and are characterized by a high degree of purity. In all genetic types, with the exception of recrystallized quartz with a content of newly formed grains of ~50 %, high concentrations of impurity elements were found, in total exceeding the maximum permissible for high-purity quartz. This is due to the presence of a large number of fluid inclusions, and the difficulty of separating them from quartz grains, as well as the difficulty of removing mineral aggregates with quartz. Intensely recrystallized quartz with a total content of newly formed grains >50 % and impurity elements less than 50 ppm is suitable for producing high-purity quartz.

Key word:

Milky-white quartz, genetic type, ICP-OES spectroscopy, high-purity quartz, impurity elements, fluid inclusions.

The author appreciates Larisa Ya. Kabanova for assistance in studying quartz petrographic features.

REFERENCES

- Vatalis K.I., Charalampides G., Platias S., Benetis N.P. Market Developments and Industrial Innovative Applications of High Purity Quartz Refines. *Procedia Economics and Finance*, 2014, vol. 14, pp. 624–633. DOI: doi.org/10.1016/S2212-5671(14)00751-5.
- Anfilogov V.N., Kabanova L.Ya., Igumentseva M.A., Nikandrova N.K. Geological structure and genesis of quartz veins of the Ufaleysky complex on the example of vein 2136. *Doklady Akademii nauk*, 2016, vol. 466, no. 2, pp. 109–112.
- Igumentseva M.A., Kuzmin V.G., Anfilogov V.N., Kabanova L.Ya., Ryzhkov V.M., Shtenberg M.V., Zaynullina R.T. Quartz of veins № 175 of the Kyshtym granular quartz deposit (South Ural) as a standard for assessing the quality of quartz raw materials. *Razvedka i okhrana nedr*, 2018, no. 5, pp. 48–53. In Rus.
- Anfilogov V.N., Kabanova L.Ya., Igumentseva M.A., Nasyrov R.Sh., Shtenberg M.V., Lebedev A.S., Ryzhkov V.M., Ardyshev P.A. Geological structure, petrography and technological characteristics of the quartz of the quartz deposit «vein Tolstikha». *Razvedka i okhrana nedr*, 2012, no. 12, pp. 12–16. In Rus.
- Ryzhkov V.M., Igumentseva M.A., Shtenberg M.V. Technology for quality assessment of quartz raw materials. *Minerals: Structure, Properties, Methods of Investigation. Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences*. Eds. S. Votyakov, D. Kiseleva, V. Grokhovsky, Y. Shchapova. Cham, Springer, 2020. pp. 195–199.
- Götze J., Pan Y., Müller A., Kotova E. L., Cerin D. Trace element compositions and defect structures of high-purity quartz from the Southern Ural region, Russia. *Minerals*, 2017, vol. 7, no. 10. DOI: 10.3390/min7100189.
- Svetov S.A., Stepanova A.V., Chazhengina S.Yu., Svetova E.N., Rybnikova Z.P., Mikhaylova A.I., Paramonov A.S., Utitsyna V.L., Ekhoval M.V., Kolodet V.S. Pretsizionny (ICP-MS, LA-ICP-MS) analiz sostava gornykh porod i mineralov: metodika i otsenka tochnosti rezultatov na primere rannedokembriyskikh mafitovykh kompleksov [Precision (ICP-MS, LA-ICP-MS) analysis of the composition of rocks and minerals: methodology and evaluation of the accuracy of the results on the example of Early Precambrian mafic complexes]. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra*, 2015, no. 7, pp. 54–73.
- Brown D., Spadea P., Puchkov V., Alvarez-Marron J., Herrington R., Willner A.P., Hetzel R., Gorozhanina Y., Juhlin C. Arc-continent collision in the Southern Urals. *Earth-Science Reviews*, 2006, vol. 79, pp. 261–287.
- Herrington R.J., Zaykov V.V., Maslennikov V.V., Brown D., Puchkov V.N. Mineral deposits of the Urals and links to geodynamic evolution. *Economic Geology*, 2005, vol. 100, no. 5, pp. 1069–1095.
- Snachev V.I. Geology, petrogeochemistry and ore content of carbon deposits in the southern part of the Uraltau zone. *Vestnik Akademii nauk RB*, 2016, vol. 21, no. 2, pp. 65–72. In Rus.
- Panyak S.G., Makarov A.B., Strashenko G.I. Features of the geological structure and formation conditions of the Novotroitsk deposit of high-purity quartz. *Izvestiya Uralskogo gosudarstvennogo gornogo universiteta*, 2001, no. 13, pp. 136–139. In Rus.
- Kovalev S.G., Timofeeva E.A., Pindyurina E.O. Geochemistry of eclogites of the Maksyutovsky complex (Southern Urals) and the genetic nature of their protoliths. *Geochemistry*, 2015, no. 4, pp. 299–327. In Rus.
- Vertushkov G.N. Razlistovanny kvarts s gory Khrustalnoy [Laminated quartz from Mountain Khrustalnaya]. *Zap. WMO*, 1946, vol. 75, pp. 257–264.
- Müller A., Wanvik J.E., Ihlen P.M. Petrological and chemical characterisation of high-purity quartz deposits with examples from Norway. *Quartz: Deposits, Mineralogy and Analytics*. Eds. J. Götze, R. Möckel. Heidelberg, Springer Geology, 2012. pp. 71–73.
- Isaev V.A. Structural impurities in quartz. P. I. Review and analysis of traditional methods of purification of quartz from structural impurities. *Gorny informatsionno-analiticheskiy byulleten*, 2006, no. 9, pp. 11–23. In Rus.
- Weil J.A. A review of electron spin spectroscopy and its application to the study of paramagnetic defects in crystalline quartz. *Physics and Chemistry of Minerals*, 1984, vol. 10, no. 4, pp. 149–165.

17. Weil J.A. A review of the EPR spectroscopy of the point defects in α -quartz: The decade 1982–1992. *Physics and chemistry of SiO₂ and the Si-SiO₂ interface 2*. New York, Plenum Press, 1993. pp. 131–144.
18. Götze J., Plotze M., Graupner T., Klaus D Hallbauer, Bray C.J. Trace element incorporation into quartz: A combined study by ICP-MS, electron spin resonance, cathodoluminescence, capillary ion analysis, and gas chromatography. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2004, vol. 68, no. 18, pp. 3741–3759. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.gca.2004.01.003> (accessed 15 June 2021).
19. Savichev A.N., Krasilnikov P.A. Statistical characteristics of impurity elements in especially pure quartz of the Ural type (ufa-
leysky quartz-vein district, southern Urals). *Mineralogy*, 2019, vol. 5, no. 1, pp. 46–56. In Rus.
20. Krylova G.I., Skobel L.S., Mitrofanov A.A., Balakirev V.G. Geological and mineralogical-geochemical information about quartz with the IOTA trademark (USA, North Carolina). Possibilities of searching for its analogues in Russia. *Uralskiy geologicheskii zhurnal*, 2003, vol. 4, no. 34, pp. 81–122. In Rus.
21. Redder E. *Flyuidnye vklyucheniya v mineralakh* [Fluid inclusions in minerals]. Moscow, Mir publ., 1987. 637 p.

Received: 23 June 2021.

Information about the author

Maria A. Korekina, Cand. Sc., researcher, South Urals Federal Research Center of Mineralogy and Geoecology of UB RAS.

УДК 540.42

ВОЗМОЖНОСТИ ГИДРОГЕОХИМИЧЕСКОЙ ТИПИЗАЦИИ ФЛЮИДНЫХ СИСТЕМ

Никитенко Ольга Александровна¹,
nikitenko.olga@list.ru

Ершов Валерий Валерьевич¹,
valery_ershov@mail.ru

¹ Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН,
Россия, 693022, г. Южно-Сахалинск, ул. Науки, 1Б.

Актуальность исследования определяется отсутствием на сегодняшний день эффективных критериев, позволяющих типизировать флюидные системы в соответствии с их составом, геологической локализацией и динамикой разгрузки подземных флюидов на земную поверхность. Исследования химического и изотопного состава разгружающихся вод позволят определить общность и различия флюидных систем разных типов, а также охарактеризовать протекающие в них основные геохимические процессы. Это необходимо для теоретического осмысления механизмов и закономерностей деятельности разных флюидопроявлений. Вопросы гидрогеохимической типизации имеют также важное практическое значение, так как разные флюидные системы предполагают разные сценарии развития связанных с ними опасных геологических процессов. Кроме того, некоторые флюидопроявления связаны с процессами генерации и миграции углеводородов, что может использоваться в качестве одного из поисковых признаков при геологоразведочных работах.

Цель исследования заключается в определении возможных критериев разделения флюидных систем разных типов по гидрогеохимическим данным.

Объекты: воды из различных систем фокусированной разгрузки подземных флюидов – осадочно-углеводородных (грязевые вулканы и термоминеральные источники), осадочно-гидротермальных (геотермальные просачивания Salton Sea и Lusi) и гидротермально-магматических (грязевые котлы и гидротермы на магматических вулканах).

Методы. Определение концентраций основных анионов (Cl^- , Br^- , SO_4^{2-}) и катионов (Li^+ , Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}) в исследуемых водах проводилось методом ионной хроматографии, содержание HCO_3^- определялось титриметрическим методом, содержание бора анализировалось спектрофотометрическим методом. Определения изотопного состава вод ($\delta^{18}\text{O}$, δD) выполнены методом инфракрасной лазерной спектроскопии. Последующая обработка гидрогеохимических данных проводилась с применением методов математической статистики. Сравнительный анализ вод флюидных систем разных типов выполнен при помощи общепринятых геохимических диаграмм.

Результаты. Выполнен сравнительный анализ широкого комплекса гидрогеохимических показателей для осадочно-углеводородных, осадочно-гидротермальных и гидротермально-магматических флюидных систем. Установлено, что эти показатели для исследуемых подземных вод имеют довольно большой разброс значений. Соответственно, для некоторых флюидных систем отсутствует явно выраженная дифференциация по анализируемым физико-химическим показателям. В частности, не обнаруживаются существенные различия в химическом составе вод грязевых вулканов и осадочно-гидротермальной системы Lusi. Это оставляет открытым вопрос о возможностях разделения этих флюидных систем на основе только гидрогеохимических данных или же ставит под сомнение правильность априорных утверждений об их различном генезисе. В то же время гидротермально-магматические системы характеризуются уникальными гидрогеохимическими свойствами, которые в значительной степени отличаются от флюидных систем других типов. Наиболее информативными признаками для них являются показатель рН, который в основном изменяется от ультракислых до кислых значений, и геохимический тип вод, характеризующийся смешанным катионным составом с высоким содержанием алюминия и железа. Кроме того, практически все изученные воды характеризуются высоким содержанием бора и лития, но диапазоны их концентраций часто пересекаются. При этом источники поступления этих химических элементов для флюидных систем областей современного магматического вулканизма отличаются от флюидных систем, связанных с осадочными бассейнами. Полученные результаты свидетельствуют о необходимости уточнения или пересмотра существующих геохимических классификаций флюидных систем.

Ключевые слова:

Флюидные системы, подземные воды, химический состав, генезис, геохимические классификации, взаимодействие вода–порода–газ.

Введение

Проблемы генезиса подземных флюидов и физико-химические условия их образования на сегодняшний день являются одними из актуальных в области наук о Земле. Фундаментальное и практическое значение этого направления исследований не вызывает сомнений, так как с флюидодинамическими процессами генетически связаны месторождения многих полезных ископаемых, в том числе месторождения нефти и газа. В земной коре содержатся флюиды, различающиеся по своему составу и происхождению.

Поэтому не менее актуальной задачей на сегодняшний день является поиск критериев, позволяющих разграничивать флюидные системы в соответствии с их составом, геологической локализацией и динамикой разгрузки подземных флюидов на земную поверхность.

Для определения генезиса флюидных систем относительно простой и информативной является их геохимическая специализация. Ранее в работе [1] на основании газогеохимических особенностей флюидов, а также в соответствии с геологическими условиями

их распространения было предложено разделять флюидные системы на три типа – гидротермально-магматические (Volcano & Hydrothermal Geothermal), осадочно-гидротермальные (Sediment-Hosted Hydrothermal) и осадочно-углеводородные (Hydrocarbon Sedimentary). Гидротермально-магматические системы распространены в районах активного магматического вулканизма и локализуются в толщах вулканогенных пород. В газовых выбросах таких систем преобладает CO_2 мантийного или метаморфического генезиса. Осадочно-углеводородные системы образуются в районах с большой мощностью осадочных отложений, обогащенных органическим веществом. Газовый состав выбросов осадочно-углеводородных систем главным образом представлен CH_4 микробиального и/или термогенного генезиса с долей термогенного CO_2 до 10 об. %. В свою очередь, осадочно-гидротермальные системы определены как гибридные (промежуточные) флюидные системы, локализованные в областях взаимодействия вулканогенных и осадочных геологических формаций. В газовых выбросах осадочно-гидротермальных систем преобладает мантийный или метаморфический CO_2 (более 50 об. %) и CH_4 , как правило, термогенного происхождения (не менее 1–2 об. %, но может достигать и 30–40 об. %).

Анализ работы [1] показывает, что границы между флюидными системами разных типов, основанные на их газогеохимических и геологических признаках, являются довольно нечеткими, и этот вопрос требует проведения дополнительных исследований. Например, все грязевые вулканы в указанной работе относятся к осадочно-углеводородному типу, отделяя их от внешне схожих с ними осадочно-гидротермальных систем. К осадочно-гидротермальным системам было предложено отнести, в частности, флюидную систему Lusi, которая изначально считалась грязевым вулканом [2]. Проведенный нами ранее сравнительный анализ геохимических данных Южно-Сахалинского грязевого вулкана и осадочно-гидротермальных систем Salton Sea и Lusi показал, что эти флюидопроявления имеют схожие геохимические признаки [3]. На этом основании можно предположить, что некоторые грязевые вулканы будут обладать признаками как осадочно-углеводородных, так и осадочно-гидротермальных флюидных систем.

Известно, что различные источники и условия формирования подземных флюидов, а также степень активности флюидных систем в той или иной степени находят отражение в изотопном и химическом составе разгружающихся вод [4–10]. Нередко изотопные и геохимические исследования вод флюидных систем (в сочетании с газогеохимическими данными) применяют для оценки вклада мантийного, корового или метаморфогенного источников, входящих в состав флюида. В этой связи целью настоящей работы являлось определение возможных критериев разделения флюидопроявлений на разные типы на основе гидрогеохимических данных. Кроме того, анализ гидрогеохимических показателей позволяет определить специфические геохимические процессы, обуславливающие формирование химическо-

го состава подземных вод, который характерен для флюидных систем того или иного типа. Это во многом поможет приблизиться к пониманию механизмов образования флюидных систем, а также установить закономерности их геологической эволюции.

Флюидная активность недр проявляется в многообразии геоморфологических форм разгрузки подземных флюидов на земную поверхность – в виде термальных источников, грязевых вулканов, грязевых котлов на магматических вулканах и т. д. Эти геоморфологические характеристики часто используются для разграничения (классификации) флюидных систем. Очевидно, что разграничение, основанное только на морфологии геологических объектов, является достаточно субъективным. Нередки случаи, когда к грязевым вулканам некоторые исследователи относят грязевые котлы и грифоны на магматических вулканах, что вызывает путаницу при обсуждении вопросов, касающихся, например, распространенности и закономерностей географического распределения грязевых вулканов на планете [11]. В данной работе будет рассмотрена возможность идентификации флюидных систем разных типов по изотопному и химическому составу их водной компоненты.

Заметим также, что наши исследования затрагивают важный прикладной аспект, который касается прогноза катастрофических явлений, связанных с флюидной активностью недр. Известно, что пароксизмальная активность некоторых флюидных систем сопровождается масштабными деформациями земной поверхности и выбросом больших объемов разжиженной сопочной брекчии (грязевые вулканы) или пирокластики (магматические вулканы). В этой связи такие флюидопроявления необходимо учитывать в качестве потенциально опасного природного фактора при проектировании инженерных объектов. Разные флюидные системы имеют разные масштаб и периодичность выбросов. Кроме того, некоторые из них (грязевые вулканы) рассматриваются как признак нефтегазоносности земных недр. Поэтому важной задачей здесь также выступает возможность геохимической идентификации разгружающихся подземных флюидов и определение типа флюидной разгрузки.

Объекты и методы исследования

В настоящей работе для выявления критериев разделения разных типов флюидных систем по геохимическим признакам проводился сравнительный анализ химического и изотопного состава их водной компоненты. Сравнение проводилось на основе собственных и опубликованных [12–24] гидрогеохимических данных. В ходе данного исследования было изучено около 300 проб из различных проявлений фокусированной разгрузки подземных флюидов, включая гидротермы на магматических вулканах, грязевые вулканы, а также термоминеральные источники. Используя типизацию, предложенную в работе [1], мы разделяем исследуемые флюидные системы на три группы – осадочно-углеводородные, осадочно-гидротермальные и гидротермально-магматические.

В качестве объектов исследования, соответствующих осадочно-углеводородному типу флюидных систем, были выбраны грязевые вулканы Азербайджана, Керченского п-ова, а также Южно-Сахалинский грязевой вулкан и Дагинское месторождение термоминеральных вод на о. Сахалин. Азербайджан является крупнейшим в мире районом развития грязевого вулканизма. По современным оценкам здесь насчитывается около 200 наземных и более 150 подводных вулканов [11]. С геотектонической позиции грязевой вулканизм в Азербайджане соответствует Южно-Каспийскому осадочному бассейну, в пределах которого мощность мезозойско-кайнозойских осадочных отложений может составлять 25–30 км [25]. Грязевые вулканы Керченского п-ова входят в состав крупной Керченско-Таманской грязевулканической провинции, на территории которой насчитывается около 100 вулканов. В геотектоническом отношении провинция расположена на периферии Индоло-Кубанского прогиба, разрез которого сложен осадочной толщей палеоцен-четвертичного возраста, мощность которой достигает 11 км [20]. На о. Сахалин выделяют четыре грязевулканических участка: Южно-Сахалинский и Лесновский грязевые вулканы – на юге, вулкан Восточный и группа Пугачевских вулканов – в центральной части, Дагинское грязевулканическое проявление – на севере [26]. Районы грязевого вулканизма на о. Сахалин расположены в пределах крупных осадочных бассейнов, мощность осадочной толщи в которых составляет около 8–10 км [27]. В данной работе использовались гидрогеохимические данные для Южно-Сахалинского грязевого вулкана и термоминеральных источников, расположенных в непосредственной близости с Дагинским грязевулканическим проявлением. Южно-Сахалинский грязевой вулкан является одним из наиболее крупных и активных грязевых вулканов в регионе. Кроме того, проведение многолетних наблюдений за деятельностью Южно-Сахалинского грязевого вулкана позволило получить представительные гидрогеохимические данные для этого вулкана. Рассматриваемые в настоящей работе Дагинские термоминеральные источники расположены на расстоянии всего нескольких сотен метров от одноименного грязевулканического проявления, поэтому мы имеем основание считать, что они единого генезиса. Поскольку химический и изотопный состав вод Дагинских термальных источников изучен в гораздо большей степени по сравнению с грязевулканическими водами на данном участке, то в работе мы используем данные, полученные для термальных источников.

К осадочно-гидротермальному типу флюидных систем были отнесены геотермальные просачивания Salton Sea (США, Калифорния) и Lusi (Индонезия, о. Ява). Геотермальная система Salton Sea расположена в осадочном бассейне в пределах прогиба Salton Trough между разломом San Andreas и северной оконечностью рифта Калифорнийского залива [21]. Флюидная система Salton Sea связана с четвертичными магматическими интрузиями, которые оказывают существенное влияние на температурный режим системы. Флюидная система Lusi расположена в заду-

говом осадочном бассейне Северо-Восточной Явы, рядом с вулcano-магматическим комплексом Arjuno-Welirang [24]. Эта система изначально считалась грязевым вулканом, которые, к слову, довольно широко распространены в этой части о. Ява. Локализация флюидной системы Lusi в осадочном бассейне, характеризующемся высокими скоростями седиментации, обогащенностью осадков органическим веществом, а также наличием многочисленных разломов, с большой вероятностью указывает на ее генетическую принадлежность к грязевым вулканам. Однако по результатам последних геохимических и сейсмических исследований был сделан вывод, что гидротермальные флюиды из вулcano-магматического комплекса Arjuno-Welirang питают Lusi через систему разломов Watukosek [28, 29]. На этом основании авторами работы [1] было предложено считать Lusi осадочно-гидротермальной системой.

Для характеристики гидротермально-магматических систем были исследованы гидротермы на магматических вулканах Камчатки и Курильских о-вов. Курило-Камчатская островная дуга является областью интенсивного новейшего магматического вулканизма. В этом регионе насчитывается несколько десятков геотермальных систем, связанных с плейстоценовыми и голоценовыми вулканами [30]. Вмещающими породами для гидротермально-магматических систем Курило-Камчатской островной дуги являются вулканические образования неоген-четвертичного возраста [30]. Здесь наблюдается большое разнообразие вулканических пород – от строводужных толеитов, до известково-щелочных серий [31]. В целом вулканогенные образования на Курильских островах представлены преимущественно андезибазальтами и андезитами (60–70 %), тогда как на Камчатке – в основном базальтами (около 50 %) [31]. В данной работе мы анализируем гидрогеохимические данные для гидротермальных систем вулканов Мутновский (п-ов Камчатка), Узон (п-ов Камчатка), Головнина (о. Кунашир), Менделеева (о. Кунашир), Баранского (о. Итуруп). Перечисленные вулканы характеризуются интенсивной сольфатарной и гидротермальной деятельностью. Очаги разгрузки подземных флюидов здесь представлены термальными источниками, грязевыми котлами, парогазовыми струями (фумаролами) и гейзерами.

В настоящей работе, помимо литературных данных [12–24], для грязевых вулканов Азербайджана, Керченского п-ова, Южно-Сахалинского грязевого вулкана, а также для грязевых котлов на магматических вулканах Головнина, Менделеева и Баранского использовались собственные гидрогеохимические данные, полученные авторами в 2015–2019 гг. Химико-аналитические исследования водных проб (определение pH и содержания основных элементов ионно-солевого состава) были выполнены в Центре коллективного пользования ИМГиГ ДВО РАН. Концентрации катионов (Li^+ , Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}) и анионов (Cl^- , Br^- , SO_4^{2-}) определялись методом ионной хроматографии, содержание HCO_3^- – титриметрическим методом, содержание бора – спектрофотометрическим

методом. Определение изотопного состава ($\delta^{18}\text{O}$, δD) в исследуемых водах выполнено в Ресурсном центре СПбГУ «Геомодель» методом инфракрасной лазерной спектроскопии. Последующая обработка и сравнительный анализ гидрогеохимических данных проводились с применением методов математической статистики, а также с использованием общепринятых геохимических диаграмм.

Результаты исследования и их обсуждение

Сравнительный анализ вод флюидных систем разных типов показал, что они характеризуются большим разбросом физико-химических параметров. Общая минерализация исследуемых вод изменяется в широких пределах: от нескольких десятков миллиграммов до сотен граммов на литр. При этом минерализация вод в пределах каждого типа флюидных систем может довольно сильно отличаться. Наибольшие колебания минерализации установлены для вод флюидных систем, расположенных в районах активного магматического вулканизма (коэффициент вариации составляет 176 %). Содержание растворенных солей в них изменяется от 0,05 до 75,8 г/л. Максимальная минерализация здесь отмечается в водах грязевых котлов Донного фумарольного поля на вулкане Мутновский за счет высокой концентрации Cl^- (до 74 г/л). Минерализация вод осадочно-гидротермальных систем находится в интервале от 2,1 до 296,4 г/л (коэффициент вариации составляет 131 %). Стоит отметить, что соленость вод флюидной системы Lusi не превышает 36 г/л, тогда как воды флюидной системы Salton Sea характеризуются значительным разбросом минерализации, которая в нескольких пробах достигает концентрации крепких рассолов. Наиболее низкий коэффициент вариации для минерализации наблюдается в водах флюидных систем осадочно-углеводородного типа (коэффициент вариации составляет 91 %). Воды грязевых вулканов имеют минерализацию от 4,5 до 175,4 г/л. При этом для большинства грязевулканических вод содержание растворенных солей находится в диапазоне от 10 до 25 г/л. Минерализация термальных вод Дагинского месторождения изменяется незначительно и находится в интервале от 1,4 до 8,5 г/л.

Показатель pH в водах исследуемых флюидных систем также сильно варьирует: от ультракислых до щелочных значений. Сопоставление величины pH с логарифмом минерализации ($\lg M$) показывает, что между данными параметрами имеется довольно отчетливая зависимость, которую приближенно можно аппроксимировать параболической кривой (рис. 1). При этом фигуративные точки на диаграмме pH– $\lg M$ образуют два достаточно обособленных поля. Воды гидротермально-магматических систем по величине pH в основном находятся в ультракислой–кислой области за исключением небольшого количества образцов, для которых реакция среды изменяется от нейтральной до щелочной. Воды грязевых вулканов, термальных источников Дагинского месторождения, а также Salton Sea и Lusi, напротив, характеризуются

более высоким уровнем pH и располагаются в околонейтральной–щелочной области.

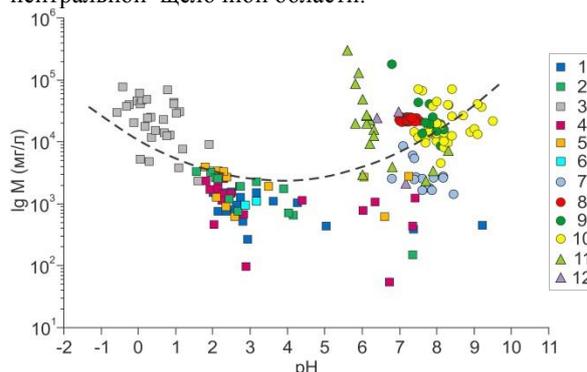


Рис. 1. Соотношение общей минерализации и pH в водах флюидных систем разных типов: 1 – грязевые котлы вулкана Узон (п-ов Камчатка); 2 – грязевые котлы вулкана Мутновский, Северо-Мутновское фумарольное поле (п-ов Камчатка); 3 – грязевые котлы вулкана Мутновский, Донное фумарольное поле (п-ов Камчатка); 4 – грязевые котлы и термальные источники вулкана Головинна на берегах оз. Кунашир; 5 – грязевые котлы и термальные источники вулкана Менделеева (о. Кунашир); 6 – грязевые котлы и термальные источники вулкана Баранского (о. Итуруп); 7 – термоминеральные источники Дагинского месторождения (о. Сахалин); 8 – Южно-Сахалинский грязевой вулкан (о. Сахалин); 9 – грязевые вулканы Азербайджана; 10 – грязевые вулканы Керченского п-ова; 11 – геотермальная система Salton Sea (Калифорния, США); 12 – геотермальная система Lusi (о. Ява, Индонезия). Пунктирной линией показан аппроксимирующий тренд

Fig. 1. Ratio of total mineralization and pH in waters from different types of fluid systems: 1 – mud pools of Uzon volcano (Kamchatka Peninsula); 2 – mud pools of Mutnovsky volcano, North-Mutnovsky fumarolic field (Kamchatka Peninsula); 3 – mud pools of Mutnovsky volcano, Donnoe fumarolic field (Kamchatka Peninsula); 4 – mud pools and thermal springs of Golovnin volcano (Kunashir Island); 5 – mud pools and thermal springs of Mendeleev volcano (Kunashir Island); 6 – mud pools and thermal springs of Baransky volcano (Iturup Island); 7 – thermomineral springs of Daginsky deposit (Sakhalin Island); 8 – Yuzhno-Sakhalinsky mud volcano (Sakhalin Island); 9 – mud volcanoes of Azerbaijan; 10 – mud volcanoes of Kerch Peninsula; 11 – geothermal system Salton Sea (California, USA); 12 – geothermal system Lusi (Java Island, Indonesia). The dotted line shows the approximating trend

На диаграмме Пайпера для исследуемых вод также наблюдается определенная дифференциация (рис. 2). Для вод гидротермально-магматических флюидных систем отмечается наибольшая контрастность в распределении основных солеобразующих компонентов. Анионный состав вод грязевых котлов и термальных источников на магматических вулканах представлен главным образом Cl^- и SO_4^{2-} , долевое соотношение которых в разных источниках может довольно сильно

изменяться. В редких случаях среди анионов может доминировать HCO_3^- , например, в некоторых термальных источниках вулкана Головнина, расположенных на берегах озера Кипящее. По содержанию катионов воды гидротермально-магматических систем еще более неоднородны. Для вод этой группы в основном характерен смешанный катионный состав с повышенным содержанием Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ . Кроме базовых катионов, в водах гидротермально-магматических систем постоянно присутствуют Al и Fe, которые в большинстве случаев играют преваляющую роль в их катионном составе. Помимо этого, отличительной особенностью термальных вод зон активного магматического вулканизма являются высокие концентрации кремния, которые в среднем на порядок выше, чем в водах осадочно-гидротермальных и осадочно-углеводородных систем.

Между тем воды осадочно-углеводородных и осадочно-гидротермальных систем довольно схожи по своему химическому составу. В катионном составе вод грязевых вулканов доминирует Na^+ , ведущими анионами являются Cl^- и HCO_3^- . Воды Дагинских термоминеральных источников характеризуются практически исключительным преобладанием Na^+ и Cl^- в своем составе. Концентрация HCO_3^- в работах [21, 23, 24] для вод Salton Sea и Lusi не определялась. Поэтому в нашей работе для вод этих флюидных систем HCO_3^- был определен расчетным путем по уравнению электронейтральности водного раствора (с учетом известных значений pH для этих вод). Согласно нашим расчетам в водах Salton Sea и Lusi доля HCO_3^- в составе анионов невысока, преобладающим анионом здесь является Cl^- , а среди катионов доминирует Na^+ . Ионы K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} и SO_4^{2-} в водах как осадочно-углеводородных, так и осадочно-гидротермальных систем имеют подчиненное значение.

Особенности накопления основных солеобразующих компонентов в водах флюидных систем разного типа указывают на влияние различных факторов и процессов на формирование их химического состава. Анионный состав растворов грязевых котлов и термальных источников на магматических вулканах свидетельствует о том, что они представляют собой смесь различных кислот – главным образом соляной и серной. Такие кислые растворы гидротермально-магматических систем образуются в результате адсорбции подземными водами (преимущественно атмосферно-инфильтрационного генезиса) вулканических газов, содержащих соединения хлора и серы [16]. В результате эксплозивных извержений магматические вулканы выбрасывают большое количество кислых газов – SO_2 , H_2S , HCl , HF и др. [32]. Кроме того, в межэруптивный период многие вулканы также выносят значительное количество магматических газов в атмосферу. Вулканические газы поглощаются в недрах гидротермальной системы и образуют кислые (ультракислые) термальные растворы преимущественно сульфатного и/или хлоридного составов. При этом существенные колебания в весовом соотношении Cl^- и SO_4^{2-} в водах исследуемых гидротермаль-

ных систем отражают разное соотношение в них магматических хлора и серы. Так, например, для термальных вод вулканов Мутновский (Северо-Мутновское фумарольное поле), Головнина и Узон характерно преобладание SO_4^{2-} с соотношениями Cl/SO_4 , равными в среднем 0,04, 0,1 и 0,2 соответственно. Тогда как в термальных водах вулканов Менделеева и Баранского доминирует Cl^- – соотношения Cl/SO_4 в среднем составляют 3,0 и 5,0 соответственно. Для вод грязевых котлов Донного фумарольного поля на вулкане Мутновский характерны наиболее высокие концентрации Cl^- с соотношением Cl/SO_4 в среднем около 22. Такие существенные различия в химическом составе вод грязевых котлов Северо-Мутновского и Донного фумарольных полей обусловлены неоднородностью газовой разгрузки в пределах вулкана Мутновский [33]. В частности, в гидротермальных газах Донного поля установлено максимальное содержание HCl с наиболее высоким отношением HCl/S . Таким образом, высокое отношение Cl/SO_4 в водах грязевых котлов Донного фумарольного поля является следствием высокохлоридного состава магматических газов на данном участке вулкана Мутновский. Отметим, что соотношения различных компонентов в вулканических газах (SO_2/HCl , SO_2/HF и др.) изменяются в зависимости от активности магматических вулканов, что делает их хорошими прогностическими признаками извержений [32]. Такие изменения газового состава в процессе вулканической деятельности также могут объяснять наблюдаемую высокую гидрохимическую вариабельность гидротермально-магматических систем.

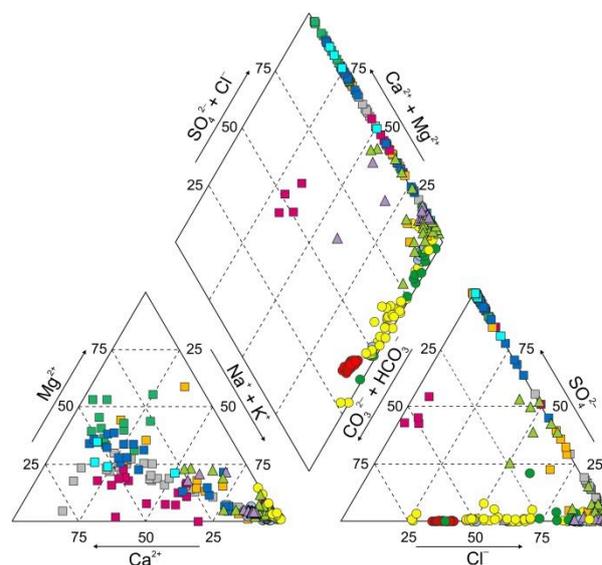


Рис. 2. Диаграмма Пайтера химического состава вод флюидных систем разных типов. Условные обозначения – на рис. 1

Fig. 2. Piper diagram of chemical composition of waters from different types of fluid systems. Legend is in Fig. 1

Катионный состав вод гидротермально-магматических систем, как правило, формируется в результате растворения водовмещающих пород под

действием растворов с низким рН. Насыщенность вод гидротермально-магматических систем кислыми вулканическими газами определяет развитие процессов кислотного выщелачивания водовмещающих пород и последующее накопление химических элементов в водном растворе. Следовательно, немаловажным фактором при формировании вод гидротермально-магматических систем является состав водовмещающих пород. Петрохимическими особенностями пород исследуемых вулканов Курило-Камчатского региона являются повышенные содержания SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 и сравнительно низкие концентрации CaO , MgO , Na_2O , K_2O [12, 34, 35]. В работе [35] на примере геотермальной системы вулкана Баранского проанализированы закономерности изменения химического состава эффузивных пород под влиянием кислых (ультракислых) термальных вод и установлено, что сульфатные и сульфатно-хлоридные термальные воды выщелачивают из породы большинство петрогенных компонентов, среди которых Al_2O_3 , FeO , MgO , CaO , Na_2O , K_2O . Согласно результатам, полученным в работе [35], следует ожидать, что концентрации Al , Fe , Mg^{2+} , Ca^{2+} , Na^+ и K^+ в водах гидротермально-магматических систем будут увеличиваться совместно с повышением кислотности водных растворов. Действительно, для вод флюидных систем данного типа установлены отрицательные корреляционные зависимости между концентрациями Al , Fe , Mg^{2+} , Ca^{2+} и K^+ . Наиболее тесная зависимость с рН выявлена для Al и Fe (коэффициенты ранговой корреляции Спирмена равны $-0,85$ и $-0,71$ соответственно). В то же время для пары рН и кремний, который в большом количестве содержится в вулканических породах, подобная корреляция отсутствует. Это объясняется тем, что минеральные формы кремнезема характеризуются относительно низкой растворимостью, т. е. достаточно быстро достигается соответствующий предел насыщения водных растворов. А основными факторами, влияющими на переход кремния в водный раствор в кислой среде, являются температура и давление [36, 37]. Кроме того, кремниевые кислоты диссоциируют при высоких значениях рН, поэтому при прочих равных условиях концентрация растворенного кремнезема будет выше в более щелочной области [38].

Для вод осадочно-углеводородных и осадочно-гидротермальных флюидных систем отмечается практически идентичное поведение основных солеобразующих компонентов, что, вероятно, может свидетельствовать о схожем механизме образования флюидных систем этих двух типов. Прежде всего, для рассматриваемых вод наблюдается тесная корреляционная зависимость между содержанием Cl^- и Na^+ . Для вод грязевых вулканов коэффициент корреляции Спирмена между концентрациями Cl^- и Na^+ составляет $0,54$, для термальных вод Дагинского месторождения – $0,99$, для вод Salton Sea и Lusi – $0,98$. Закономерный рост концентраций ионов Cl^- и Na^+ указывает на единый источник поступления данных макрокомпонентов в водный раствор. В первую очередь положительную линейную корреляцию между Na^+ и Cl^-

можно рассматривать в качестве одного из признаков, что основным источником водной компоненты данных флюидных систем являются седиментационно-погребенные воды морского генезиса, которые в зависимости от показателя общей минерализации испытывали концентрирование или разбавление пресными водами. Одним из наиболее значимых процессов, способных привести к существенному опреснению вод бассейнов седиментации, являются реакции перекристаллизации смектита в иллит, которые сопровождаются выделением в поровое пространство большого количества низкоминерализованных вод [39]. Однако химический состав вод осадочно-углеводородных и осадочно-гидротермальных флюидных систем довольно сильно отличается от стандартного состава морской воды не только по показателю общей минерализации, но и по соотношению основных катионов и анионов. Нормирование концентраций основных компонентов ионно-солевого состава по содержанию хлора показало, что для этих вод отмечается общая тенденция к истощению K^+ , Mg^{2+} , SO_4^{2-} и обогащению Na^+ , HCO_3^- относительно морской воды. Концентрации Ca^{2+} в исследуемых водах во многом регулируется карбонатно-кальциевым равновесием, поэтому какой-либо отчетливой тенденции по данному показателю не наблюдается. Известно, что наряду с процессами разбавления и испарительного концентрирования, воды осадочных бассейнов, начиная со стадии диагенеза, претерпевают значительные изменения химического состава. Поэтому наблюдаемые изменения химического состава седиментационных вод могут быть следствием широкого спектра геохимических процессов, протекающих в системе «вода–порода–газ–органическое вещество». Это растворение (конгруэнтное и инконгруэнтное) водовмещающих пород, гидролиз, сорбция–десорбция элементов из обменного комплекса глин, вторичное минералообразование, растворение подземных газов, биогеохимическая активность и др. Интенсивность протекания перечисленных процессов определяет разную степень метаморфизации исходных вод, питающих каждую из флюидных систем, и наблюдаемые относительные различия их гидрогеохимических параметров.

Геохимический облик седиментационных вод определяется множеством факторов, среди которых немаловажная роль принадлежит составу растворенных газов. Большое влияние на процессы взаимодействия в системе «вода–порода–газ» оказывает концентрация растворенного в водах CO_2 , который активно вступает в реакцию с водовмещающими породами, вызывая растворение, осаждение и преобразование минералов [39, 40]. Основными компонентами газового состава рассматриваемых осадочно-углеводородных и осадочно-гидротермальных флюидных систем являются CH_4 и CO_2 в разном соотношении. Самые высокие концентрации CO_2 наблюдаются в составе свободных газов Южно-Сахалинского грязевого вулкана – от 60 до 95 об. % [41], Salton Sea – от 97 до 99 об. % [23], а также Lusi – от 25 до 88 об. % [42]. В газах грязевых вулканов Керченского п-ова доминирует CH_4 , при

этом доля CO_2 в некоторых вулканах может достигать 90 об. %, но в среднем по региону его концентрация составляет около 14 об. % [43]. Грязевулканические газы в Азербайджане содержат меньше всего CO_2 – 1,6 об. %, но в отдельных вулканах его содержание может доходить до 12 об. % [43]. Выходы газов в пределах термальных источников Дагинского месторождения состоят преимущественно из CH_4 , концентрация которого варьирует от 83 до 93 об. %, тогда как содержание CO_2 в них минимально и не превышает 2 об. % [19].

Разную степень метаморфизации вод осадочно-углеводородных и осадочно-гидротермальных флюидных систем наиболее существенно отражают концентрации Na^+ и HCO_3^- . Максимальное обогащение Na^+ характерно для вод грязевых вулканов – отношение Na/Cl в них значительно превышает этот показатель для морской воды (который равен 0,55). При этом отношение Na/Cl в водах разных грязевулканических провинций изменяется в довольно широких пределах. Для вод вулканов Азербайджана Na/Cl составляет в среднем 0,88, для вод вулканов Керченского п-ова – 1,02, для вод Южно-Сахалинского грязевого вулкана – 1,48. В термальных водах Дагинского месторождения отношение Na/Cl несколько ниже, чем в водах грязевых вулканов, и в среднем составляет 0,72, что в целом является довольно близким к значению данного показателя для морской воды. В свою очередь, для вод флюидных систем Salton Sea и Lusi отношения Na/Cl наиболее близко соответствуют аналогичному отношению для морской воды и в среднем составляют 0,67 и 0,56 соответственно. Кроме того, отношение Na/Cl в водах грязевых вулканов положительно коррелирует с концентрацией HCO_3^- . Коэффициент корреляции Спирмена между концентрацией HCO_3^- и отношением Na/Cl для грязевулканических вод составляет 0,84. Экстраполяция данной зависимости показывает, что для грязевулканических вод с наиболее низким содержанием HCO_3^- отношение Na/Cl является довольно близким к значению этого показателя для морской воды.

Мы полагаем, что существенное увеличение концентраций Na^+ в водах грязевых вулканов вызвано процессами гидролитического выщелачивания натрийсодержащих пород алюмосиликатного состава (например, альбита – $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$). При этом среди целого ряда факторов, определяющих интенсивность процессов гидролиза, одна из главных ролей принадлежит насыщенности грязевулканических вод CO_2 . Растворяясь под высоким давлением, CO_2 переходит в форму HCO_3^- , тем самым повышая его концентрацию в грязевулканических водах. Наряду с этим насыщенность грязевулканических вод CO_2 усиливает их агрессивность к водовмещающим алюмосиликатным породам, в результате чего происходит интенсивное выщелачивание Na^+ из водовмещающих пород. Кроме того, этот процесс может сопровождаться поступлением в водный раствор не только Na^+ , но и целого ряда других подвижных катионов, например K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} [44]. Однако, помимо действия CO_2 на интенсивность разложения алюмосили-

катных пород, весьма существенными факторами, оказывающими влияние на переход подвижных катионов из кристаллической решетки минералов в водный раствор, является массовое соотношение взаимодействующих твердой и жидкой фаз, а также продолжительность их взаимодействия. По всей видимости, именно сочетание всех перечисленных факторов определяет более высокую степень метаморфизации вод грязевых вулканов по сравнению с водами осадочно-гидротермальных флюидных систем Salton Sea и Lusi.

Стоит отметить, что для вод гидротермально-магматических систем зависимость между Na^+ и Cl^- является довольно слабой – коэффициент корреляции Спирмена равен 0,35. Воды флюидных систем районов магматического вулканизма из-за пестроты химического состава характеризуются очень широким диапазоном значений Na/Cl – в основном от 0,005 до 10. При этом в основном характерны или очень низкие, или, наоборот, очень высокие значения отношения Na/Cl , которые существенно отличаются от данного соотношения в морской воде. Такие значения отношения Na/Cl свидетельствуют об относительно слабом участии вод морского генезиса при формировании гидротерм на тех магматических вулканах, которые рассматриваются в настоящей работе. Тем не менее присутствие морских вод довольно часто отмечается в составе гидротерм, расположенных на побережье. Например, на о. Кунашир к такому типу относится геотермальное месторождение Горячий Пляж на вулкане Менделеева [16].

Изотопный состав вод гидротермально-магматических, осадочно-углеводородных и осадочно-гидротермальных флюидных систем имеет определенные различия. Концентрации стабильных изотопов кислорода и водорода термальных вод области современного магматического вулканизма Камчатки и Курильских островов, а также термальных вод Дагинского месторождения свидетельствуют о том, что основным источником питания для них служат метеорные воды. Воды гидротермально-магматических флюидных систем формируют область непосредственно на линии метеорных вод или вблизи нее с некоторым положительным кислородным сдвигом. В основном эти воды характеризуются значениями $\delta^{18}\text{O}$ и δD в интервалах (–11; –1) ‰ и (–90; –30) ‰ SMOW соответственно. Тогда как термальные воды Дагинского месторождения локализуются непосредственно на линии метеорных вод без проявления каких-либо выраженных изотопных сдвигов. Значения $\delta^{18}\text{O}$ и δD в них изменяются незначительно и находятся преимущественно в интервалах (–15; –14) ‰ и (–106; –103) ‰ соответственно. В свою очередь, изотопный состав вод грязевых вулканов, а также флюидных систем Lusi и Salton Sea наиболее существенно отличается от изотопного состава метеорных вод и характеризуется наиболее высокими значениями $\delta^{18}\text{O}$. В целом диапазоны значений $\delta^{18}\text{O}$ и δD для вод грязевых вулканов и флюидной системы Lusi практически совпадают и составляют в основном (0; +11) ‰ и (–30; +2) ‰ соответственно. Воды флюидной системы Salton Sea отличаются бо-

лее легким изотопным составом и преимущественно характеризуются значениями $\delta^{18}\text{O}$ и δD в интервалах (–11; –2) ‰ и (–90; –52) ‰ соответственно, т. е. они занимают некоторое промежуточное положение между гидротермами на магматических вулканах и грязе-вулканическими водами.

Таким образом, практически все рассматриваемые в данной работе флюидные системы демонстрируют различное отклонение значений $\delta^{18}\text{O}$ от линии метеорных вод в сторону утяжеления (рис. 3). Однако необходимо учитывать, что данные флюидные системы располагаются на разных широтах (от 54° с.ш. до 7° ю.ш.). Поэтому широтный эффект, заключающийся в облегчении изотопного состава метеорных вод при приближении к полюсам Земли, в разной степени проявляется и в изотопном составе водной компоненты флюидных систем. Соответственно, для наиболее объективного сравнения изотопных параметров исследуемых вод необходимо использовать такой показатель, как отклонение изотопного состава кислорода от линии метеорных вод – кислородный сдвиг. Значения кислородных сдвигов для вод грязевых вулканов, а также Salton Sea и Lusi, отличаются довольно незначительно и характеризуются максимальными значениями среди рассматриваемых флюидных систем. Для вод гидротермально-магматических систем значения кислородных сдвигов являются наиболее низкими.

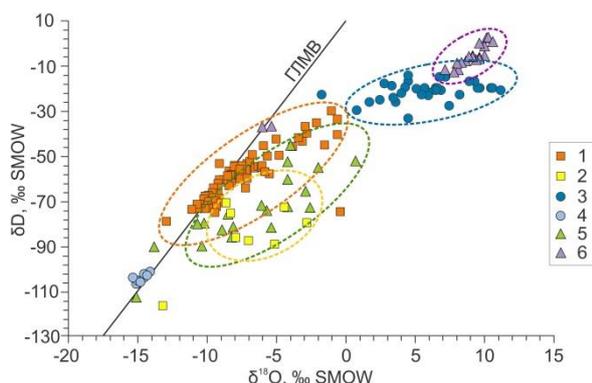


Рис. 3. Изотопный состав вод флюидных систем разных типов: 1 – грязевые котлы и термальные источники на магматических вулканах Курильских о-вов; 2 – грязевые котлы и термальные источники на магматических вулканах Камчатского п-ова; 3 – грязевые вулканы Азербайджана, Керченского п-ова и о. Сахалин; 4 – термоминеральные источники Дагинского месторождения (о. Сахалин); 5 – геотермальная система Salton Sea (Калифорния, США); 6 – геотермальная система Lusi (о. Ява, Индонезия). ГЛМВ – глобальная линия метеорных вод

Fig. 3. Isotopic composition of waters from different types of fluid systems: 1 – mud pools and thermal springs on the magmatic volcanoes of Kuril Islands; 2 – mud pools and thermal springs on the magmatic volcanoes of Kamchatka Peninsula; 3 – mud volcanoes of Azerbaijan, Kerch Peninsula and Sakhalin Island; 4 – thermomineral springs of Darginsky deposit (Sakhalin Island); 5 – geothermal system Salton Sea (California, USA); 6 – geothermal system Lusi (Java Island, Indonesia). GMWL – Global Meteoric Water Line

Изотопный состав вод рассматриваемых флюидных систем отличается также по углу наклона линейных трендов, что указывает на различия процессов их формирования. Ряд проведенных исследований [16–18, 22] показывает, что основными процессами, влияющими на наблюдаемые изотопные эффекты в водах гидротермально-магматических систем Курило-Камчатского региона, являются: кинетическое фракционирование при кипении или длительном испарении, смешение метеорных вод с морскими и/или магматическими водами, а также взаимодействие с водовмещающими породами. Что касается процессов формирования изотопного состава грязевулканических вод, то для большинства грязевых вулканов мира изотопный состав их водной компоненты в основном формируются в результате смешения седиментационно-погребенных морских вод с метеорными и дегидратационными водами [45]. При этом определенный вклад при формировании изотопного состава грязевулканических вод оказывают также изотопный обмен с водовмещающими породами и подземное испарение. Флюидные системы Salton Sea и Lusi, которые, как считается, относятся к одному и тому же типу флюидопроявлений, демонстрируют некоторые различия в генетическом происхождении водной компоненты флюидов. По мнению [24] воды флюидной системы Lusi формируются в результате смешения морских вод с дегидратационными и метеорными водами, кроме того, значительное влияние на изотопный состав вод оказывают процессы испарения. Тогда как, согласно работам [21, 23], основным источником вод для Salton Sea выступают метеорные воды. При этом столь высокая соленость вод флюидной системы Salton Sea объясняется смешением исходных метеорных вод с глубинными водами морского генезиса, а также выщелачиванием соленосных отложений и процессами испарения.

Важным показателем специфики исследуемых вод является содержание (а также соотношение между собой) в них таких компонентов, как Cl, B и Li. Перечисленные компоненты постоянно присутствуют в подземных водах, однако их соотношения могут довольно сильно различаться в разных генетических типах вод, отражая тем самым геохимические условия и процессы накопления данных элементов в водном растворе. Диаграмма Cl–1000*Li–25*B не показывает четкой дифференциации флюидных систем разного типа, так как воды в пределах гидротермально-магматических, осадочно-углеводородных и осадочно-гидротермальных систем имеют различную степень обогащения бором и литием (рис. 4). В целом высокие относительные концентрации бора свойственны в основном для вод грязевых вулканов, а также для части проб из термальных источников на вулканах Головнина и Менделеева и грязевых котлов на вулканах Узон и Баранского. Тогда как наиболее высокие относительные концентрации лития были установлены в водах Salton Sea и в гидротермах вулканов Узон, Баранского и Менделеева. Кроме того, высокое содержание лития отмечается также в водах

Южно-Сахалинского грязевого вулкана и в нескольких пробах из грязевых вулканов Керченского п-ова.

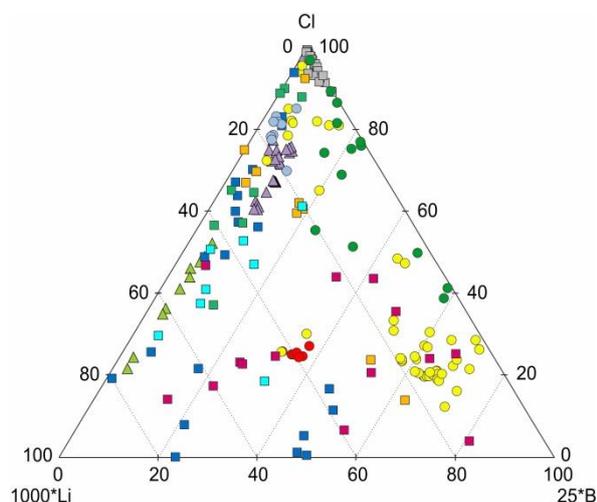


Рис. 4. Соотношение концентраций Cl, Li и B (в мг/л) в водах флюидных систем разных типов. Условные обозначения – на рис. 1

Fig. 4. Ratio of Cl, Li and B concentrations (in mg/l) in waters from different types of fluid systems. Legend is in Fig. 1

Соотношения Cl/V и Li/Cl в подземных водах используются в качестве индикаторов для отслеживания источников водного питания флюидных систем, а также для оценки взаимодействий, происходящих в системе «вода–порода» [5, 8, 9, 46]. Стоит сразу отметить, что отношение Cl/V в большинстве изученных вод существенно ниже, чем в морской воде и атмосферных осадках. Обычно атмосферные осадки характеризуются довольно низкими концентрациями хлора и особенно бора, но по мере приближения к морским побережьям метеорные воды, как правило, имеют соотношение Cl/V как в морской воде (которое составляет около 4200) за счет поступления в них морских аэрозолей [5]. В своем исследовании мы использовали модифицированную (объединенную) диаграмму из работ [5, 6], которая иллюстрирует соотношения Cl/V в природных водах разных генетических типов и основные процессы, изменяющие это соотношение. При нанесении данных о содержании B и Cl в водах исследуемых флюидных систем на эту диаграмму было установлено, что между ними существуют определенные различия (рис. 5). Воды гидротермально-магматических флюидных систем характеризуются широким диапазоном значений отношения Cl/V. Массовые отношения Cl/V в этих водах в основном изменяются от соотношений, соответствующих морской воде, до очень низких значений (менее 10). На диаграмме Cl–B воды гидротермально-магматических систем в основном ложатся на кривую, соответствующую растворению водовмещающих пород с повышением температуры. Как правило, Cl и B извлекаются из вулканических пород приблизительно в стехиометрических пропорциях, поэтому отношение Cl/V в водах гидротермально-магматических систем обычно соответствует таковому в породе. При

этом соотношение концентраций Cl и B в вулканических породах варьируют в зависимости от их типа [5, 7, 46]. Например, для толеитовых базальтов массовое отношение Cl/V в основном находится в диапазоне от 83 до 167, тогда как в щелочных базальтах это отношение несколько ниже и может составлять вплоть до 45 [5]. Фигуративные точки для части гидротермально-магматических систем располагаются вокруг кривой, соответствующей увеличению содержания Cl и B за счет дегазации магмы или концентрирования бора в результате фазового перехода воды в водяной пар. Такие воды характеризуются очень низким отношением Cl/V и обычно содержат более высокие концентрации бора, чем водовмещающие породы. Считается, что на ранних стадиях дегазации магмы происходит дифференциальное выделение Cl и B в свободную фазу – дегазация Cl завершается несколько позже, чем дегазация B. Это приводит к образованию ранней фазы магматического пара с низким отношением Cl/V по сравнению с исходной магмой [5]. Фазовый переход жидкость–пар при высоких температурах может также привести к обогащению геотермальных вод бором, которые будут иметь отношения Cl/V ниже, чем в породе [5]. Среди вод рассматриваемых гидротермально-магматических систем небольшая часть проб имеет отношение Cl/V близкое к морской воде. Такое соотношение концентраций Cl и B является признаком смешения с водами морского генезиса, а также может указывать на начальный этап взаимодействия вода–порода при низких температурах.

Широкий разброс фигуративных точек в пределах областей, иллюстрирующих процессы поступления Cl и B в воды гидротермально-магматических систем, можно объяснить влиянием нескольких факторов. В первую очередь, на распределение Cl и B в гидротермальных водах влияют вариации концентраций данных элементов в исходных породах, а также возможное отклонение от их стехиометрического растворения. Кроме того, наблюдаемые вариации отношения Cl/V могут быть также обусловлены поэтапным изменением состава выделяемых летучих компонентов при дегазации магмы в процессе ее консолидации [5, 47]. Источником ценных сведений о составе летучих компонентов магмы являются конденсаты фумарольных газов. Продолжительные исследования конденсатов фумарольных газов на вулкане Шивелуч (п-ов Камчатка) показали, что при изменении температуры конденсатов от 100 до 360 °C в них наблюдалось значительное колебание концентраций бора – от 5 до 74 мг/л, в очень широком диапазоне изменялось и соотношение Cl/V – от 29 до 500 [47].

Воды осадочно-углеводородных и осадочно-гидротермальных флюидных систем, несмотря на преимущественно морской генезис, в основном характеризуются отношением Cl/V существенно ниже, чем в морской воде (рис. 5). На диаграмме Cl–B воды указанных флюидных систем большей частью располагаются в поле, которое, согласно работе [6], соответствует солоноватым водам Cl–Na типа зон аномально высоких пластовых давлений. При этом небольшая часть проб из грязевых вулканов Азербайджана и

Керченского п-ова, а также Salton Sea попадает в области соленых вод и рассолов Cl–Ca состава. Воды, соответствующие этим фигуративным точкам, отличаются наиболее высокой минерализацией в пределах флюидных систем своего типа (от 41 до 296 г/л) и имеют исключительно Cl–Na состав. Значения отношения Na/Cl в этих водах слабо отличаются от данного показателя в морской воде, однако соотношения Cl/Br в них существенно выше, чем в морской воде. На этом основании можно предположить, что повышение минерализации этих вод происходит за счет

выщелачивания галогенных отложений (в частности, галита), которое сопровождается высокими значениями отношения Cl/Br. Исключением здесь выступают несколько проб из грязевых вулканов Керченского п-ова, для которых отношения Cl/Br являются близкими к данному отношению в морской воде. Поэтому формирование высокоминерализованных вод в грязевых вулканах Керченского п-ова, вероятно, во многом обусловлено процессами испарительного концентрирования.

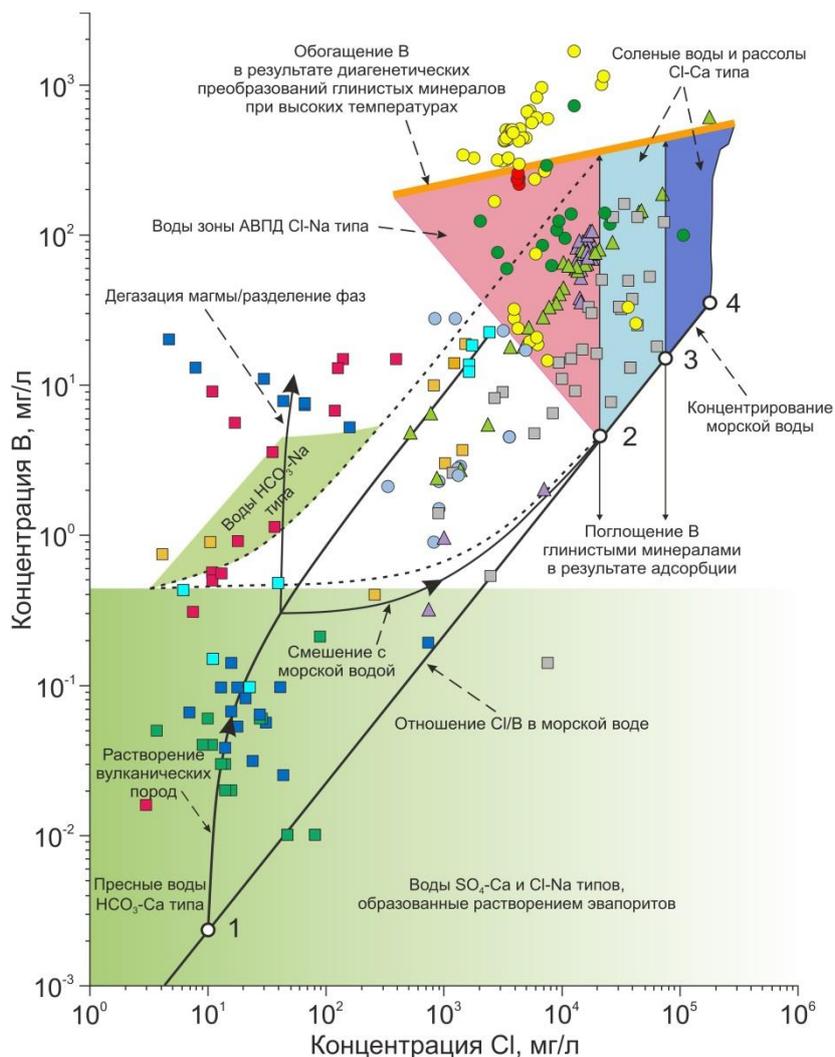


Рис. 5. Соотношение концентраций В и Cl в водах флюидных систем разных типов, нанесенные на модифицированную диаграмму из [5, 6]. Зеленое поле – подземные воды метеорного происхождения; розовое поле – воды, развитые в зонах аномально высоких пластовых давлений (АВПД); голубое поле – соленые воды и рассолы; коричневое поле – воды, образованные в результате диагенетических преобразований глинистых минералов. Точка 1 – атмосферные осадки побережья Исландии; точка 2 – морская вода; точки 3 и 4 – насыщение гипсом и галитом при концентрировании морской воды соответственно. Условные обозначения – на рис. 1

Fig. 5. Ratio of B and Cl concentrations in waters from different types of fluid systems plotted on a modified diagram from [5, 6]. Green field – groundwater of meteoric origin; pink field – overpressured waters; blue fields – salt waters and brines; brown field – diagenetic waters. Point 1 is the precipitation of the coast of Iceland; point 2 is the seawater; 3 and 4 are the points of gypsum and halite saturation during seawater evaporation, respectively. Legend is in Fig. 1

Отметим, что при сопоставимых концентрациях Cl воды осадочно-углеводородных и осадочно-гидротермальных флюидных систем могут существенно различаться по содержанию бора. Так,

например, максимальное обогащение вод бором установлено для грязевых вулканов Керченского п-ова, где его концентрации достигают очень высоких значений – до 1636 мг/л. Такое высокое содержание бора

в грязевулканических водах на сегодняшний день установлено только в Керченско-Таманской провинции [20]. По этой причине большая часть фигуративных точек для грязевых вулканов Керченского п-ова расположена за пределами поля, иллюстрирующего соотношения Cl/B в водах, развитых в зонах аномально высоких пластовых давлений. В работе [6] это поле построено на основе данных для грязевых вулканов всего из трех грязевулканических провинций – Тринидада и Тобаго, Италии и Азербайджана.

Значения отношения Cl/B в водах осадочно-углеводородных и осадочно-гидротермальных флюидных систем указывает на высокую степень обогащения этих вод бором относительно морской воды. Основным источником отступления бора в воды осадочных бассейнов выступают песчано-глинистые морские отложения, повышенные содержания бора в которых обусловлены его активной адсорбцией глинистыми минералами [48, 49]. Процесс адсорбции бора во многом определяется минеральным составом глин (соотношением каолинита, иллита, смектита и хлорита), поскольку наибольшей сорбционной способностью к бору характеризуются минералы группы иллита [48, 49]. Ключевым фактором, влияющим на процессы адсорбции–десорбции бора, является температура. Адсорбция бора глинистыми минералами протекает при низких температурах, тогда как процесс десорбции бора происходит с повышением температуры и полностью завершается при достижении $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ [50]. Считается, что значительное влияние на перераспределение бора в системе «вода–порода» оказывают реакции перекристаллизации смектита в иллит, в результате которых происходит выделение в поровое пространство большого количества изотопно-тяжелой дегидратационной воды, обогащенной бором [51]. В частности, именно этим процессом принято объяснять поступление бора в воды грязевых вулканов [20]. В то же время экспериментальными работами [48, 52] установлено, что при трансформации смектита в иллит бор может включаться в тетраэдрические центры аутигенного иллита, замещая кремний, что будет приводить к выведению части бора из водного раствора.

Известно, что определенная часть бора в осадочных отложениях связана с органическим веществом. По мнению [52, 53] рассеянное органическое вещество, которым обогащены осадочные отложения, также может выступать потенциальным источником поступления бора в воды седиментационных бассейнов. В работе [52] отмечается, что температурные условия, при которых проходит перекристаллизация смектита в иллит, совпадают с температурами генерации нефти («нефтяного окна»). Предполагается, что процесс термического разложения керогена также может способствовать повышению растворенного бора в водах осадочных бассейнов, связанных со скоплениями углеводородов. Вероятно, поступление бора в воды Дагинских термальных источников, которые расположены недалеко от крупных нефтегазовых месторождений, могут быть обусловлены именно этим процессом. Поступление бо-

ра в результате термического разложения керогена вполне вероятно и для вод грязевых вулканов, которые часто совмещаются с крупными нефтегазовыми месторождениями.

Содержание лития в водах рассматриваемых флюидных систем весьма неоднородно. В водах гидротермально-магматических систем концентрации лития колеблются от $0,001$ до $3,6$ мг/л. В водах осадочно-углеводородных и осадочно-гидротермальных систем содержание лития изменяется от $0,04$ до $35,8$ мг/л и от $0,003$ до 49 мг/л соответственно. При этом значения отношения Li/Cl , которое часто используется в качестве индикатора смешения с водами морского генезиса, для большей части исследуемых вод демонстрируют существенное обогащение литием относительно морской воды. Наибольшая степень обогащения вод литием установлена для вод гидротермально-магматических систем – в грязевых котлах вулкана Узон, для которых максимальное значение отношения Li/Cl достигает $6,7$. Тогда как для вод осадочно-гидротермальных систем максимальное значение отношения Li/Cl составляет $0,003$, а в водах осадочно-углеводородных систем этот показатель не превышает $0,002$.

Накопление лития в исследуемых водах во многом определяется процессами взаимодействия в системе «вода–порода». Экспериментальные исследования, проведенные в работе [46], по оценке гидротермального изменения вулканогенных пород разного состава при высоких температурах (до $350\text{ }^{\circ}\text{C}$) показали, что поступление лития в воды гидротермально-магматических систем происходит за счет растворения породы. В ходе этих экспериментов было установлено, что андезит, базальт и риолит в результате высокотемпературного взаимодействия с водой источаются по отношению к литию, а также хлору и бору. При этом отмечается, что мобилизация лития из вулканических пород в водный раствор происходила только на начальных этапах гидротермального изменения (при температурах менее $200\text{ }^{\circ}\text{C}$). Тогда как при повышении температуры подвижность лития уменьшалась за счет его включения во вторичные гидротермальные минералы, такие как кварц и хлорит. Следовательно, отношения Li/Cl , а также Li/B в водах геотермально-магматических систем будут уменьшаться с ростом температуры. При этом необходимо отметить, что в гидротермально-измененных магматических породах, обогащенных иллитом, может наблюдаться повышение значений Li/B из-за адсорбции бора глинистыми минералами при низких температурах [46].

Для вод, развитых в осадочных бассейнах, увеличение содержания лития, помимо аккумуляции в результате концентрирования морской воды, обусловлено также его поступлением из осадочных отложений в результате ионно-обменных реакций, процессов выщелачивания и литогенеза осадков. Большую роль при извлечении лития из осадочных пород играют температурные условия. Эксперименты по гидротермальному изменению осадочных отложений в широком диапазоне температур (от 25 до $350\text{ }^{\circ}\text{C}$) показали,

что при нагревании водный раствор обогащается как литием, так и бором [54]. При этом до 150 °С бор проявляет более высокую подвижность по сравнению с литием. Кроме того, было установлено, что при понижении температуры (до 60 °С) происходит адсорбция бора глинистыми минералами, тогда как признаков адсорбции лития при аналогичных температурах не наблюдается. На этом основании можно сделать вывод, что при развитии высокотемпературных процессов в осадочных бассейнах будет наблюдаться снижение значений отношения Li/B. Таким образом, наблюдаемые вариации содержания В и Li в исследуемых водах определяются не только разным составом водовмещающих пород, но и различными температурными условиями взаимодействия вода–порода.

Заключение

Сравнительный анализ гидрогеохимических характеристик флюидных систем разных типов – гидротермально-магматических, осадочно-углеводородных и осадочно-гидротермальных – показал, что имеющиеся между ними различия не позволяют провести однозначную типизацию этих систем. Границы между разными рассматриваемыми типами флюидных систем часто оказываются нечеткими. В частности, показано, что осадочно-углеводородные и осадочно-гидротермальные системы имеют схожие гидрогеохимические признаки, что оставляет открытым вопрос о принципиально различном генезисе этих флюидных систем. Наибольшее сходство из них проявляют воды грязевых вулканов и геотермальной системы Lusi. На основании этого мы склонны считать, что Lusi правильнее относить к грязевым вулканам. Водная фаза осадочно-углеводородных и осадочно-гидротермальных систем формируется с различной долей участия седиментационно-погребенных вод морского генезиса, а также метеорных и дегидратационных вод. В большинстве случаев воды этих флюидных систем принадлежат к Cl–Na типу, но при этом часть вод из грязевых вулканов относится к Cl–HCO₃–Na и HCO₃–Cl–Na типам.

В то же время воды гидротермально-магматических систем характеризуются довольно уникальными гидрогеохимическими свойствами, которые существенно отличают их от флюидных систем других типов. Воды гидротермально-магматических систем, имеющие преимущественно атмосферно-инфильтрационное происхождение, выделяются весьма сложным и разнообразным химическим составом, поскольку их формирование происходит под влиянием как экзогенных, так и эндогенных факторов, среди которых можно выделить участие агрессивных магматических газов, ювенильных флюидов, специфический состав вулканогенных водовмещающих пород и высокий тепловой поток. Гидрогеохимические особенности гидротермально-магматических систем

наиболее значительно проявляются в катионном и анионном составе и величине pH. Для вод здесь характерна кислая (или ультракислая) среда, преобладание в составе анионов Cl⁻ и SO₄²⁻, смешанный катионный состав, который представлен преимущественно Al и Fe, а также базовыми катионами – Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺. Отсюда понятно, что грязевые котлы в районах магматических вулканов, которые хотя внешне и очень схожи с грифонами и сальзами грязевых вулканов, не могут считаться проявлениями грязевого вулканизма.

В составе вод рассматриваемых флюидных систем в значительных количествах присутствуют такие элементы, как бор и литий. При этом их концентрации в пределах каждого типа флюидных систем могут довольно сильно различаться. Наблюдаемая изменчивость содержания бора и лития в исследуемых водах во многом обусловлены процессами, протекающими в системе «вода–порода». Специфика этих процессов определяется целым рядом факторов, из которых наибольшее влияние на содержание бора и лития в исследуемых водах оказывают вещественный состав вмещающих пород и температурные условия. Кроме того, наибольшее обогащение вод гидротермально-магматических систем бором связано с поступлением магматогенных флюидов в результате дегазации мантии. Поэтому высокие содержания бора в водах областей современного магматического вулканизма выступают индикатором эндогенных процессов. В свою очередь, выявленные различия по содержанию бора в водах осадочно-углеводородных и осадочно-гидротермальных систем определяются интенсивностью процессов взаимодействия воды с вмещающими породами, что в конечном итоге отражает разную степень диагенетической эволюции осадочных бассейнов.

Таким образом, результаты наших исследований позволяют говорить о том, что предложенную в работе [1] классификацию флюидных систем, включая критерии выделения разных их генетических типов в рамках этой классификации, нельзя считать бесспорной и однозначной. Очевидно, что требуются либо поиск, разработка и обоснование специфических геохимических критериев, более тонко «чувствующих» выделяемые типы флюидопроявлений, либо уточнение или пересмотр самой классификации, в которой будут несколько иные взгляды на генезис и механизм деятельности флюидных систем. Мы склонны считать, что ближе к истине находится второе из этих утверждений. В частности, мы полагаем, что флюидная система Lusi генетически схожа с грязевыми вулканами и нет достаточных оснований для ее выделения в отдельный тип.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 17-17-01056II).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sediment-hosted geothermal systems: review and first global mapping / M. Procesi, G. Ciotoli, A. Mazzini, G. Etiope // Earth-Science Reviews. – 2019. – V. 192. – P. 529–544. URL:

<https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.03.020> (дата обращения 15.12.2021).

2. Cyranoski D. Indonesian eruption: muddy waters // Nature. – 2007. – V. 445. – P. 812–815. URL: <https://doi.org/10.1038/445812a> (дата обращения 15.12.2021).

3. On the problem of geochemical signatures of mud volcanoes and sediment-hosted hydrothermal systems / V.V. Ershov, O.A. Nikitenko, Yu.A. Perstneva, D.D. Bondarenko, G.V. Ustyugov // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2019. – V. 324. – P. 1–7. URL: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/324/1/012020> (дата обращения 15.12.2021).
4. Лаврушин В.Ю. Подземные флюиды Большого Кавказа и его обрамления. – М.: ГЕОС, 2012. – 348 с.
5. Arnorsson S., Andresdottir A. Processes controlling the distribution of boron and chlorine in natural waters in Iceland // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 1995. – V. 59. – № 20. – P. 4125–4146. URL: [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(95\)00278-8](https://doi.org/10.1016/0016-7037(95)00278-8) (дата обращения 15.12.2021).
6. Boschetti T., Toscani L., Salvioli Mariani E. Boron isotope geochemistry of Na-bicarbonate, Na-chloride, and Ca-chloride waters from the Northern Apennine Foredeep basin: other pieces of the sedimentary basin puzzle // *Geofluids*. – 2015. – V. 15. – № 4. – P. 546–562. URL: <https://doi.org/10.1111/gfl.12124> (дата обращения 15.12.2021).
7. From source to surface: tracking magmatic boron and chlorine input into the geothermal systems of the Taupo Volcanic Zone, New Zealand / F. Bégué, C.D. Deering, D.M. Gravley, I. Chambefort, B.M. Kennedy // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. – 2017. – V. 346. – P. 141–150. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2017.03.008> (дата обращения 15.12.2021).
8. Characterizing the hydrogeochemistry of two low-temperature thermal systems in Central Mexico / J.I. Morales-Arredondo, M.V. Esteller-Alberich, M.A. Armentia Hernández, T.A.K. Martínez-Florentino // *Journal of Geochemical Exploration*. – 2018. – V. 185. – P. 93–104. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jgexplo.2017.11.006> (дата обращения 15.12.2021).
9. Torbehbar A.K., Sattari S.M. Geochemistry and isotope study of discharged geothermal fluids, NW Sabalan Geothermal Field, NW Iran // *Proceedings World Geothermal Congress 2015*. – Melbourne, 2015. – P. 1–9.
10. Taran Yu., Kalacheva E. Acid sulfate-chloride volcanic waters; formation and potential for monitoring of volcanic activity // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. – 2020. – V. 405. – P. 1–14. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2020.107036> (дата обращения 15.12.2021).
11. Атлас грязевых вулканов мира / Ад.А. Алиев, И.С. Гулиев, Ф.Г. Дадашев, Р.Р. Рахманов. – Баку: Nafta-Press, 2015. – 322 с.
12. Газогидротермы активных вулканов Камчатки и Курильских островов: состав, строение, генезис / С.Б. Бортникова, Е.П. Бессонова, М.П. Гора, А.Я. Шевко, Г.Л. Панин, И.Н. Ельцов, Р.В. Жарков, Т.А. Котенко, С.П. Бортникова, Ю.А. Манштейн, Л.В. Котенко, Д.Н. Козлов, Н.А. Абросимова, Ю.Г. Карин, Е.В. Поспеева, А.Ю. Казанский. – Новосибирск: ИНГ СО РАН, 2013. – 282 с.
13. Ершов В.В., Левин Б.В. Новые данные о вещественном составе продуктов деятельности грязевых вулканов Керченского полуострова // *Доклады Академии наук*. – 2016. – Т. 471. – № 1. – С. 82–86. URL: <https://doi.org/10.7868/S0869565216310182> (дата обращения 15.12.2021).
14. Жарков Р.В. Дагинское месторождение термоминеральных вод на севере о. Сахалин // *Природные катастрофы: изучение, мониторинг, прогноз*. – Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2008. – С. 285–290.
15. Жарков Р.В. Термальные источники Южных Курильских островов. – Владивосток: Дальнаука, 2014. – 378 с.
16. Гидротермальная система вулкана Менделеева, о. Кунашир, Курильские острова: геохимия и вынос магматических компонентов / Е.Г. Калачева, Ю.А. Таран, Т.А. Котенко, С. Ингуаджигато, Е.В. Волошина // *Вулканология и сейсмология*. – 2017. – № 5. – С. 18–15. URL: <https://doi.org/10.7868/S0203030617050029> (дата обращения 15.12.2021).
17. Калачева Е.Г., Таран Ю.А. Процессы, контролирующие изотопный состав (δD и $\delta^{18}O$) термальных вод Курильской островной дуги // *Вулканология и сейсмология*. – 2019. – № 4. – С. 3–17. URL: <https://doi.org/10.31857/S0203-0306201943-17> (дата обращения 15.12.2021).
18. Распределение $\delta^{18}O$ и δD в гидротермальных водах Камчатки / Н.А. Буданцева, А.Ю. Бычков, Ю.Н. Чижова, Ю.К. Васильчук // *Вестник Московского университета. Серия 5. География*. – 2011. – № 3. – С. 67–71.
19. Жарков Р.Ф. Современные физико-химические особенности термоминеральных вод Дагинского месторождения (о. Сахалин) // *Мониторинг. Наука и технологии*. – 2018. – Вып. 4. – № 37. – С. 35–40. URL: <https://doi.org/10.25714/MNT.2018.37.004> (дата обращения 15.12.2021).
20. Boron in an onshore mud volcanic environment: case study from the Kerch Peninsula, the Caucasus continental collision zone / E.V. Sokol, S.N. Kokh, O.A. Kozmenko, V.Yu. Lavrushin, E.V. Belogub, P.V. Khvorov, O.E. Kikvadze // *Chemical Geology*. – 2019. – V. 525. – P. 58–81. URL: <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2019.07.018> (дата обращения 15.12.2021).
21. Fluid origin, gas fluxes and plumbing system in the sediment-hosted Salton Sea Geothermal System (California, USA) / A. Mazzini, H.H. Svensen, G. Etiope, N. Onderdonk, D. Banks // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. – 2011. – V. 205. – № 3–4. – P. 67–83. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2011.05.008> (дата обращения 15.12.2021).
22. Hydrothermal system and acid lakes of Golovnin caldera, Kunashir, Kuril Islands: geochemistry, solute fluxes and heat output / E. Kalacheva, Yu. Taran, E. Voloshina, S. Inguaggiato // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. – 2017. – V. 346. – P. 10–20. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2017.06.001> (дата обращения 15.12.2021).
23. Processes controlling water and hydrocarbon composition in seeps from the Salton Sea geothermal system, California, USA / H. Svensen, D.A. Karlsen, A. Sturz, K. Backer-Owe, D.A. Banks, S. Planke // *Geology*. – 2007. – V. 35. – № 1. – P. 85–88. URL: <https://doi.org/10.1130/G23101A.1> (дата обращения 15.12.2021).
24. The geochemistry and origin of the hydrothermal water erupted at Lusi, Indonesia / A. Mazzini, F. Scholz, H.H. Svensen, C. Hensen, S. Hadi // *Marine and Petroleum Geology*. – 2018. – V. 90. – P. 52–66. URL: <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2017.06.018> (дата обращения 15.12.2021).
25. Геология Азербайджана. Т. VII. Нефть и газ. – Баку: Nafta-Press, 2008. – 672 с.
26. Никитенко О.А., Ершов В.В. Гидрогеохимическая характеристика проявлений грязевого вулканизма на острове Сахалин // *Геосистемы переходных зон*. – 2020. – Т. 4. – № 3. – С. 321–350. URL: <https://doi.org/10.30730/grtz.2020.4.3.321-335.336-350> (дата обращения 15.12.2021).
27. Кайнозой Сахалина и его нефтегазоносность / Ю.Б. Гладенков, О.К. Баженова, В.И. Гречин, Л.С. Маргулис, Б.А. Сальников. – М.: ГЕОС, 2002. – 225 с.
28. The Arjuno-Welirang volcanic complex and the connected Lusi system: geochemical evidences / S. Inguaggiato, A. Mazzini, F. Vita, A. Sciarra // *Marine and Petroleum Geology*. – 2018. – V. 90. – P. 67–76. URL: <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2017.10.015> (дата обращения 15.12.2021).
29. The plumbing system feeding the Lusi eruption revealed by ambient noise tomography / M.J. Fallahi, A. Obermann, M. Lupi, K. Karyono, A. Mazzini // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. – 2017. – V. 122. – № 10. – P. 8200–8213. URL: <https://doi.org/10.1002/2017JB014592> (дата обращения 15.12.2021).
30. Effects of hydrothermal alterations on physical and mechanical properties of rocks in the Kuril–Kamchatka island arc / Yu. Frolova, V. Ladygin, S. Rychagov, D. Zukhubaya // *Engineering Geology*. – 2014. – V. 183. – P. 80–95. URL: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2014.10.011> (дата обращения 15.12.2021).
31. Авдейко Г.П., Палуева А.А., Хлебородова О.А. Геодинамические условия вулканизма и магматообразования Курило-Камчатской островодужной системы // *Петрология*. – 2006. – Т. 14. – № 3. – С. 249–267.
32. A review on volcanic gas compositions related to volcanic activities and non-volcanological effects / S. Lee, N. Kang, M. Park, J.Y. Hwang, H. Yun, H.Y. Jeong // *Geosciences Journal*. – 2018. – V. 22. – № 1. – P. 183–197. URL: <https://doi.org/10.1007/s12303-017-0056-y> (дата обращения 15.12.2021).
33. Источники летучих компонентов для вулкана зоны субдукции: Мутновский, Камчатка / М.Е. Зеленский, Ю.А. Таран, О.Е. Дубинина, В.Н. Шапарь, Е.А. Польшцева // *Геохимия*. – 2012. – № 6. – С. 555–575.

34. О строении вулкана Менделеева (Курильские острова) и генезисе его пород / В.Л. Сывороткин, Л.В. Сазонова, С.Т. Подгорнова // Электронное научное издание Альманах Пространство и Время. – 2012. – Т. 1. – № 1. – С. 1–5.
35. Преобразование эффузивных пород под воздействием кислотного выщелачивания поверхностными термальными водами (геотермальная система Баранского, о-в Итуруп) / В.М. Ладыгин, Ю.В. Фролова, С.Н. Рычагов // Вулканология и сейсмология. – 2014. – № 1. – С. 20–37. URL: <https://doi.org/10.7868/S0203030614010039> (дата обращения 15.12.2021).
36. Crundwell F.K. On the mechanism of the dissolution of quartz and silica in aqueous solutions // ACS Omega. – 2017. – V. 2. – P. 1116–1127. URL: <https://doi.org/10.1021/acsomega.7b00019> (дата обращения 15.12.2021).
37. Rapid water-rock interactions evidenced by hydrochemical evolution of flowback fluid during hydraulic stimulation of a deep geothermal borehole in granodiorite: Pohang, Korea / N.M. Burnside, R. Westaway, D. Banks, G. Zimmermann, H. Hofmann, A.J. Boyce // Applied Geochemistry. – 2019. – V. 111. – P. 104–445. URL: <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2019.104445> (дата обращения 15.12.2021).
38. Драйвер Дж. Геохимия природных вод / пер. с англ. – М.: Мир, 1985. – 440 с.
39. Kharaka Y.K., Hanor J.S. Treatise on geochemistry. Ch. 7.14. Deep fluids in sedimentary basins. – Oxford: Elsevier Ltd., 2014. – P. 471–515. URL: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-095975-7.00516-7> (дата обращения 15.12.2021).
40. Potential CO₂ intrusion in near-surface environments: a review of current research approaches to geochemical processes / Z. Derakhshan-Nejad, J. Sun, S. Yun, G. Lee // Environmental Geochemistry and Health. – 2019. – V. 41. – P. 2339–2364. URL: <https://doi.org/10.1007/s10653-019-00263-0> (дата обращения 15.12.2021).
41. Ершов В.В., Шакиров Р.Б., Обжиров А.И. Изотопно-геохимические характеристики свободных газов Южно-Сахалинского грязевого вулкана и их связь с региональной сейсмичностью // Доклады Академии наук. – 2011. – Т. 440. – № 2. – С. 256–261.
42. Mazzini A., Etiope G., Svensen H.H. A new hydrothermal scenario for the 2006 Lusi eruption, Indonesia. Insights from gas geochemistry // Earth and Planetary Science Letters. – 2012. – V. 317–318. – P. 305–318. URL: <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2011.11.016> (дата обращения 15.12.2021).
43. Ершов В.В., Бондаренко Д.Д. Характеристика изотопного и химического состава газов, выбрасываемых грязевыми вулканами из разных регионов мира // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. – 2020. – № 3. – С. 23–35. URL: <https://doi.org/10.31857/S0869780920030029> (дата обращения 15.12.2021).
44. Шварцев С.Л. Общая гидрогеология. – М.: Недра, 1996. – 423 с.
45. Никитенко О.А., Ершов В.В. Глобальные закономерности формирования изотопного состава ($\delta^{18}\text{O}$, δD) грязевулканических вод // Вестник КРАУНЦ. – 2017. – № 34. – Вып. 2. – С. 49–60.
46. Reyes A.G., Trompeter W.J. Hydrothermal water-rock interaction and the redistribution of Li, B and Cl in the Taupo Volcanic Zone, New Zealand // Chemical Geology. – 2012. – V. 314–317. P. 96–112. URL: <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2012.05.002> (дата обращения 15.12.2021).
47. Башарина Л.А. Эксгалиции базальтовых и андезитовых лав камчатских вулканов // Современный вулканизм. Труды Второго Всесоюзного вулканологического совещания. – М.: Наука, 1996. – Т. 1. – С. 139–146.
48. Boron isotope geochemistry during diagenesis. P. I. Experimental determination of fractionation during illitization of smectite / L.B. Williams, R.L. Hervig, J.R. Holloway, I. Hutcheon // Geochimica et Cosmochimica Acta. – 2001. – V. 65. – № 11. – P. 1769–1782. URL: [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(01\)00557-9](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(01)00557-9) (дата обращения 15.12.2021).
49. The boron isotope geochemistry of smectites from sodium, magnesium and calcium bentonite deposits / M.H. Köster, L.B. Williams, P. Kudejova, H.A. Gilg // Chemical Geology. – 2019. – V. 510. – P. 166–187. URL: <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2018.12.035> (дата обращения 15.12.2021).
50. Experimental study of boron geochemistry: implications for fluid processes in subduction zones / C.F. You, A.J. Spivack, J.M. Gieskes, R. Rosenbauer, J.L. Bischoff // Geochimica et Cosmochimica Acta. – 1995. – V. 59. – № 12. – P. 2435–2442. URL: [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(95\)00137-9](https://doi.org/10.1016/0016-7037(95)00137-9) (дата обращения 15.12.2021).
51. Kopf A., Deyhle A. Back to the roots: boron geochemistry of mud volcanoes and its implications for mobilization depth and global B cycling // Chemical Geology. – 2002. – V. 192. – № 3–4. – P. 195–210. URL: [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(02\)00221-8](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(02)00221-8) (дата обращения 15.12.2021).
52. The influence of organic matter on the boron isotope geochemistry of the gulf coast sedimentary basin, USA / L.B. Williams, R.L. Hervig, M.E. Wieser, I. Hutcheon // Chemical Geology. – 2001. – V. 174. – № 4. – P. 445–461. URL: [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(00\)00289-8](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(00)00289-8) (дата обращения 15.12.2021).
53. Evidence of hydrocarbon-rich fluid interaction with clays: clay mineralogy and boron isotope data from gulf of Cadiz Mud Volcano Sediments / R. Martos-Villa, M.P. Mata, L.B. Williams, F. Nieto, X.A. Rey, C.I. Sainz-Diaz // Minerals. – 2020. – V. 10. – № 8. – P. 1–25. URL: <https://doi.org/10.3390/min10080651> (дата обращения 15.12.2021).
54. You C.F., Gieskes J.M. Hydrothermal alteration of hemi-pelagic sediments – experimental evaluation of geochemical processes in shallow subduction zones // Applied Geochemistry. – 2001. – V. 16. – P. 1055–1066. URL: [https://doi.org/10.1016/S0883-2927\(01\)00024-5](https://doi.org/10.1016/S0883-2927(01)00024-5) (дата обращения 15.12.2021).

Поступила 31.12.2020 г.

Информация об авторах

Никитенко О.А., научный сотрудник отдела исследования вещественного состава геосфер Центра коллективного пользования Института морской геологии и геофизики ДВО РАН.

Ершов В.В., кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник отдела исследования вещественного состава геосфер Центра коллективного пользования Института морской геологии и геофизики ДВО РАН.

UDC 540.42

POSSIBILITY OF HYDROGEOCHEMICAL CLASSIFICATION OF FLUID SYSTEMS

Olga A. Nikitenko¹,
nikitenko.olga@list.ru

Valery V. Ershov¹,
valery_ershov@mail.ru

¹ Institute of Marine Geology and Geophysics Far Eastern Branch Russian Academy of Science,
1B, Nauki street, Yuzhno-Sakhalinsk, 693022, Russia.

The relevance of the study is caused by the lack of effective indicators to date that allow classifying fluid systems in accordance with their substance composition, geological settings and dynamics of fluids discharge to the earth's surface. Studies of the chemical and isotopic composition of the water from fluid systems will make it possible to determine the commonality and differences in origin of fluid systems of different types, as well as to describe the main geochemical processes occurring in them. This is necessary for theoretical understanding of the mechanisms and patterns of activity of different fluid systems. Problems of hydrogeochemical classification are also of great practical importance, since different fluid systems imply various scenarios for development of hazardous geological processes associated with them. Apart from that, some fluid systems are associated with the generation and migration of hydrocarbons, which can be used as one of the prospecting signs in exploration.

The aim of the study is to determine possible indicators for recognizing fluid systems of different types using hydrogeochemical characteristics.

Objects: waters from different systems of focused discharge of subsurface fluids – Hydrocarbon Sedimentary (mud volcanoes and thermomineral springs), Sediment-Hosted Hydrothermal (geothermal seepage of the Salton Sea and Lusi) and Volcano & Hydrothermal Geothermal (mud pools and hydrotherms on magmatic volcanoes).

Methods. Concentrations of the main anions (Cl^- , Br^- , SO_4^{2-}) and cations (Li^+ , Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}) in the studied waters were determined by the method of ion chromatography; HCO_3^- concentration was determined by the titrimetric method; the boron content was determined by the spectrophotometric method. The isotopic composition of waters ($\delta^{18}\text{O}$, δD) was determined by infrared laser spectrometry. Subsequent processing of hydrogeochemical data was done using the methods of mathematical statistics. The comparative study of waters from fluid systems of different types was conducted using the generally accepted geochemical diagrams.

Results. The present paper is a comparative study of a wide range of hydrogeochemical indicators of fluid systems – Hydrocarbon Sedimentary, Sediment-Hosted Hydrothermal, and Volcano & Hydrothermal Geothermal. It was found that these indicators for the studied groundwater have a wide range of values. Consequently, for some fluid systems there is no clearly pronounced differentiation according to the analyzed physico-chemical parameters. In particular, no significant differences were found in chemical composition of the waters from mud volcanoes and the Sediment-Hosted Hydrothermal System Lusi. It does not allow solving the problem of recognition of these fluid systems using only hydrogeochemical characteristics, or casts doubt on the correctness of antecedent statements about their different origin. At the same time, Volcano & Hydrothermal Geothermal systems are characterized by unique hydrogeochemical properties that differ significantly from other types of fluid systems. The most informative signs for these fluid systems are the pH, which mainly varies from ultra acidic to acidic values, and the geochemical type of waters, characterized by a mixed cationic composition with a high content of aluminum and iron. In addition, the waters of most of the studied fluid systems are characterized by high content of boron and lithium, but their concentration ranges often overlap. At the same time, the sources of these chemical elements for the fluid systems of the regions of modern magmatic volcanism differ from the fluid systems associated with sedimentary basins. The results obtained indicate the need to revise the existing geochemical classifications of fluid systems.

Key words:

Fluid systems, groundwater, chemical composition, origin, geochemical classifications, water–rock–gas interaction.

The study was supported by the Russian Science Foundation (grant no. 17-17-01056P).

REFERENCES

1. Procesi M., Ciotoli G., Mazzini A., Etiopie G. Sediment-hosted geothermal systems: Review and first global mapping. *Earth-Science Reviews*, 2019, vol. 192, pp. 529–544. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.03.020> (accessed 15 December 2020).
2. Cyranoski D. Indonesian eruption: muddy waters. *Nature*, 2007, vol. 445, pp. 812–815. Available at: <https://doi.org/10.1038/445812a> (accessed 15 December 2020).
3. Ershov V.V., Nikitenko O.A., Perstneva Yu.A., Bondarenko D.D., Ustyugov G.V. On the problem of geochemical signatures of mud volcanoes and sediment-hosted hydrothermal systems. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019, vol. 324, pp. 1–7. Available at: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/324/1/012020> (accessed 15 December 2020).
4. Lavrushin V.Yu. *Podzemnye flyuidy Bolshogo Kavkaza i ego obramleniya* [Subsurface fluids of the Greater Caucasus and its surrounding]. Moscow, GEOS, 2012. 348 p.
5. Amorrison S., Andresdottir A. Processes controlling the distribution of boron and chlorine in natural waters in Iceland. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1995, vol. 59, no. 20, pp. 4125–4146. Available at: [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(95\)00278-8](https://doi.org/10.1016/0016-7037(95)00278-8) (accessed 15 December 2020).
6. Boschetti T., Toscani L., Salvioli E. Mariani Boron isotope geochemistry of Na-bicarbonate, Na-chloride, and Ca-chloride waters from the Northern Apennine Foredeep basin: other pieces of the sedimentary basin puzzle. *Geofluids*, 2015, vol. 15, no. 4, pp. 546–562. Available at: <https://doi.org/10.1111/gfl.12124> (accessed 15 December 2020).
7. Bégué F., Deering C.D., Gravley D.M., Chambeftort I., Kennedy B.M. From source to surface: tracking magmatic boron and chlorine input into the geothermal systems of the Taupo Volcanic Zone, New Zealand. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2017, vol. 346, pp. 141–150. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2017.03.008> (accessed 15 December 2020).

8. Morales-Arredondo J.I., Esteller-Alberich M.V., Armienta Hernández M.A., Martínez-Florentino T.A.K. Characterizing the hydrogeochemistry of two low-temperature thermal systems in Central Mexico. *Journal of Geochemical Exploration*, 2018, vol. 185, pp. 93–104. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2017.11.006> (accessed 15 December 2020).
9. Torbehbar A.K., Sattari S.M. Geochemistry and isotope study of discharged geothermal fluids, NW Sabalan Geothermal Field, NW Iran. *Proceedings World Geothermal Congress 2015*. Melbourne, 2015. pp. 1–9.
10. Taran Yu., Kalacheva E. Acid sulfate-chloride volcanic waters; Formation and potential for monitoring of volcanic activity. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2020, vol. 405, pp. 1–14. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2020.107036> (accessed 15 December 2020).
11. Aliev Ad.A., Guliev I.S., Dadashev F.G., Rahmanov R.R. *Atlas gryazevykh vulkanov mira* [Atlas of the world mud volcanoes]. Baku, Nafta-Press, 2015. 322 p.
12. Bortnikova S.B., Bessonova E.P., Gora M.P., Shevko A.Ya., Panin G.L., El'tsov I.N., Zharkov R.V., Kotenko T.A., Bortnikova S.P., Manshteyn Yu.A., Kotenko L.V., Kozlov D.N., Abrosimova N.A., Karin Yu.G., Pospeeva E.V., Kazanskiy A.Yu. *Gazogidrotermiya aktivnykh vulkanov Kamchatki i Kuril'skikh ostrovov: sostav, stroenie, genesis* [Gas-hydrotherms of active volcanoes of Kamchatka and the Kuril Islands: composition, structure, genesis]. Novosibirsk, IPGG SB RAS, 2013. 282 p.
13. Ershov V.V., Levin B.V. New data on the material composition of mud volcano products on Kerch Peninsula. *Doklady Earth Sciences*, 2016, vol. 471, no. 1, pp. 1149–1153. Available at: <https://doi.org/10.1134/S1028334X16110027> (accessed 15 December 2020).
14. Zharkov R.V. Darginskoe mestorozhdenie termomineralnykh vod na severe o. Sakhalin [Darginsky deposit of thermomineral waters in the north of Sakhalin Island]. *Prirodnye katastrofy: izucheniye, monitoring, prognoz* [Natural hazards: study, monitoring, forecast]. Yuzhno-Sakhalinsk, IMG FEB RAS, 2008. pp. 285–290.
15. Zharkov R.V. *Termalnye istochniki Yuzhnykh Kuril'skikh ostrovov* [Thermal springs of the South Kuril islands]. Vladivostok, Dalnauka, 2014. 378 p.
16. Kalacheva E.G., Taran Yu.A., Kotenko T.A., Inguadzhianto S., Voloshina E.V. The hydrothermal system of Mendeleev Volcano, Kunashir Island, Kuril Islands: The geochemistry and the transport of magmatic components. *Journal of Volcanology and Seismology*, 2017, vol. 11, pp. 335–352. Available at: <https://doi.org/10.1134/S0742046317050037> (accessed 15 December 2020).
17. Kalacheva E.G., Taran Yu.A. Processes controlling isotopic composition (δD and $\delta^{18}O$) of thermal waters of the Kuril Island Arc. *Journal of Volcanology and Seismology*, 2019, vol. 13, pp. 201–215. Available at: <https://doi.org/10.1134/S0742046319040031> (accessed 15 December 2020).
18. Budantseva N.A., Bychkov A.Yu., Chizhova Yu.N., Vasilchuk Yu.K. Distribution of $\delta^{18}O$ and δD in hydrothermal waters of the Kamchatka Peninsula. *Moscow University Bulletin. Series 5, Geography*, 2011, vol. 3, pp. 67–71. In Rus.
19. Zharkov R.F. Modern physicochemical features of the thermal mineral water of the Darginsky deposit (Sakhalin Island). *Monitoring. Science and Technologies*, 2018, vol. 4, no. 37, pp. 35–40. In Rus. Available at: <https://doi.org/10.25714/MNT.2018.37.004> (accessed 15 December 2020).
20. Sokol E.V., Kokh S.N., Kozmenko O.A., Lavrushin V.Yu., Belogub E.V., Khvorov P.V., Kikvadze O.E. Boron in an onshore mud volcanic environment: Case study from the Kerch Peninsula, the Caucasus continental collision zone. *Chemical Geology*, 2019, vol. 525, pp. 58–81. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2019.07.018> (accessed 15 December 2020).
21. Mazzini A., Svensen H.H., Etiope G., Onderdonk N., Banks D. Fluid origin, gas fluxes and plumbing system in the sediment-hosted Salton Sea Geothermal System (California, USA). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2011, vol. 205, no. 3–4, pp. 67–83. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2011.05.008> (accessed 15 December 2020).
22. Kalacheva E., Taran Yu., Voloshina E., Inguaggiato S. Hydrothermal system and acid lakes of Golovnin caldera, Kunashir, Kuril Islands: geochemistry, solute fluxes and heat output. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2017, vol. 346, pp. 10–20. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2017.06.001> (accessed 15 December 2020).
23. Svensen H., Karlsen D.A., Sturz A., Backer-Owe K., Banks D.A., Planke S. Processes controlling water and hydrocarbon composition in seeps from the Salton Sea geothermal system, California, USA. *Geology*, 2007, vol. 35, no. 1, pp. 85–88. Available at: <https://doi.org/10.1130/G23101A.1> (accessed 15 December 2020).
24. Mazzini A., Scholz F., Svensen H.H., Hensen C., Hadi S. The geochemistry and origin of the hydrothermal water erupted at Lusi, Indonesia. *Marine and Petroleum Geology*, 2018, vol. 90, pp. 52–66. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2017.06.018> (accessed 15 December 2020).
25. *Geologiya Azerbaydzhana. T. VII. Neft i gaz* [Geology of Azerbaijan. Vol. VII. Oil and gas]. Baku, Nafta-Press, 2008. 672 p.
26. Nikitenko O.A., Ershov V.V. Hydrogeochemical characteristic of mud volcanism manifestations on Sakhalin Island. *Geosystems of Transition Zones*, 2020, vol. 4, no. 3, pp. 321–350. In Rus. Available at: <https://doi.org/10.30730/grtz.2020.4.3.321-335.336-350> (accessed 15 December 2020).
27. Gladenkov Yu.B., Bazhenova O.K., Grechin V.I., Margulis L.S., Salnikov B.A. *Kaynozoy Sakhalina i ego neftegazonosnost* [The Cenozoic geology and the oil and gas presence in Sakhalin]. Moscow, GEOS Publ., 2002. 225 p.
28. Inguaggiato S., Mazzini A., Vita F., Sciarra A. The Arjuno-Welirang volcanic complex and the connected Lusi system: geochemical evidences. *Marine and Petroleum Geology*, 2018, vol. 90, pp. 67–76. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2017.10.015> (accessed 15 December 2020).
29. Fallahi M.J., Obermann A., Lupi M., Karyono K., Mazzini A. The Plumbing system feeding the Lusi eruption revealed by ambient noise tomography. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2017, vol. 122, no. 10, pp. 8200–8213. Available at: <https://doi.org/10.1002/2017JB014592> (accessed 15 December 2020).
30. Frolova Yu., Ladygin V., Rychagov S., Zukhubaya D. Effects of hydrothermal alterations on physical and mechanical properties of rocks in the Kuril–Kamchatka island arc. *Engineering Geology*, 2014, vol. 183, pp. 80–95. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2014.10.011> (accessed 15 December 2020).
31. Avdeyko G.P., Palueva A.A., Khleborodova O.A. Geodynamic conditions of volcanism and magma formation in the Kurile–Kamchatka island-arc system. *Petrology*, 2006, vol. 14, no. 3, pp. 230–246. Available at: <https://doi.org/10.1134/S0869591106030027> (accessed 15 December 2020).
32. Lee S., Kang N., Park M., Hwang J.Y., Yun H., Jeong H.Y. A review on volcanic gas compositions related to volcanic activities and non-volcanological effects. *Geosciences Journal*, 2018, vol. 22, no. 1, pp. 183–197. Available at: <https://doi.org/10.1007/s12303-017-0056-y> (accessed 15 December 2020).
33. Zelenskiy M.E., Taran Yu.A., Dubinina O.E., Shapar V.N., Polyntseva E.A. Sources of volatiles for a subduction zone volcano: Mutnovsky volcano, Kamchatka. *Geochemistry International*, 2012, vol. 50, no. 6, pp. 502–521. <https://doi.org/10.1134/S001670291204009X> (accessed 15 December 2020).
34. Syvorotkin V.L., Sazonova L.V., Podgornova S.T. On structure of Mendeleev volcano (Kurilias) and its rocks genesis. *Electronic scientific publication Almanac Space and Time*, 2012, vol. 1, no. 1, pp. 1–5. In Rus.
35. Ladygin V.M., Frolova Yu.V., Rychagov S.N. The alteration of effusive rocks due to acidic leaching by shallow thermal waters: The Baranskiy geothermal system, Iturup Island. *Journal of Volcanology and Seismology*, 2014, vol. 1, pp. 20–37. Available at: <https://doi.org/10.1134/S0742046314010035> (accessed 15 December 2020).
36. Crundwell F.K. On the mechanism of the dissolution of quartz and silica in aqueous solutions. *ACS Omega*, 2017, vol. 2, pp. 1116–1127. Available at: <https://doi.org/10.1021/acsomega.7b00019> (accessed 15 December 2020).
37. Burnside N.M., Westaway R., Banks D., Zimmermann G., Hofmann H., Boyce A.J. Rapid water-rock interactions evidenced by hydrochemical evolution of flowback fluid during hydraulic stimulation of a deep geothermal borehole in granodiorite: Pohang, Korea. *Applied Geochemistry*, 2019, vol. 111, pp. 104–445. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2019.104445> (accessed 15 December 2020).
38. Drever J.I. *The geochemistry of natural waters*. New Jersey, Prentice-Hall, inc., Englewood Cliffs, 1982. 388 p.

39. Kharaka Y.K., Hanor J.S. *Treatise on geochemistry. Ch. 7.14. Deep fluids in sedimentary basins*. Oxford, Elsevier Ltd., 2014. pp. 471–515. Available at: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-095975-7.00516-7> (accessed 15 December 2020).
40. Derakhshan-Nejad Z., Sun J., Yun S., Lee Potential G. CO₂ intrusion in near-surface environments: a review of current research approaches to geochemical processes. *Environmental Geochemistry and Health*, 2019, vol. 41, pp. 2339–2364. Available at: <https://doi.org/10.1007/s10653-019-00263-0> (accessed 15 December 2020).
41. Ershov V.V., Shakirov R.B., Obzhurov A.I. Isotopic-geochemical characteristics of free gases of the South Sakhalin mud volcano and their relationship to regional seismicity. *Doklady Earth Sciences*, 2011, vol. 440, pp. 1334–1339. Available at: <https://doi.org/10.1134/S1028334X11090169> (accessed 15 December 2020).
42. Mazzini A., Etiopie G., Svensen H.H. A new hydrothermal scenario for the 2006 Lusi eruption, Indonesia. Insights from gas geochemistry. *Earth and Planetary Science Letters*, 2012, vol. 317–318, pp. 305–318. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2011.11.016> (accessed 15 December 2020).
43. Ershov V.V., Bondarenko D.D. Characterization of isotopic and chemical composition of gases ejected from mud volcanoes in different regions of the world. *Geoecology. Engineering geology. Hydrogeology. Geocryology*, 2020, vol. 3, pp. 23–35. In Rus. Available at: <https://doi.org/10.31857/S0869780920030029> (accessed 15 December 2020).
44. Shvartsev S.L. *Obshchaya gidrogeologiya* [General hydrogeology]. Moscow, Nedra Publ., 1996. 423 p.
45. Nikitenko O.A., Ershov V.V. Global patterns in formations of isotopic composition ($\delta^{18}\text{O}$, δD) of water from mud volcanoes. *Bulletin of KRAESC. Earth Sciences*, 2017, vol. 34 (2), pp. 49–60. In Rus.
46. Reyes A.G., Trompeter W.J. Hydrothermal water-rock interaction and the redistribution of Li, B and Cl in the Taupo Volcanic Zone, New Zealand. *Chemical Geology*, 2012, vol. 314–317, pp. 96–112. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2012.05.002> (accessed 15 December 2020).
47. Basharina L.A. Eksgalyatsii bazaltovykh i andezitovykh lav kamchatskikh vulkanov [Exhalation of basaltic and andesitic lavas of the Kamchatka volcanoes]. *Sovremenny vulkanizm. Trudy Vtorogo Vsesoyuznogo vulkanologicheskogo soveshchaniya* [Modern volcanism. Transactions of the Second All-Union Volcanological Meeting]. Moscow, Nauka Publ., 1996. Vol. 1. pp. 139–146.
48. Williams L.B., Hervig R.L., Holloway J.R., Hutcheon I. Boron isotope geochemistry during diagenesis. Part I. Experimental determination of fractionation during illitization of smectite. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2001, vol. 65, no. 11, pp. 1769–1782. Available at: [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(01\)00557-9](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(01)00557-9) (accessed 15 December 2020).
49. Köster M.H., Williams L.B., Kudejova P., Gilg H.A. The boron isotope geochemistry of smectites from sodium, magnesium and calcium bentonite deposits. *Chemical Geology*, 2019, vol. 510, pp. 166–187. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2018.12.035> (accessed 15 December 2020).
50. You C.F., Spivack A.J., Gieskes J.M., Rosenbauer R., Bischoff J.L. Experimental study of boron geochemistry: implications for fluid processes in subduction zones. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1995, vol. 59, no. 12, pp. 2435–2442. Available at: [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(95\)00137-9](https://doi.org/10.1016/0016-7037(95)00137-9) (accessed 15 December 2020).
51. Kopf A., Deyhle A. Back to the roots: boron geochemistry of mud volcanoes and its implications for mobilization depth and global B cycling. *Chemical Geology*, 2002, vol. 192, no. 3–4, pp. 195–210. Available at: [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(02\)00221-8](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(02)00221-8) (accessed 15 December 2020).
52. Williams L.B., Hervig R.L., Wieser M.E., Hutcheon I. The influence of organic matter on the boron isotope geochemistry of the gulf coast sedimentary basin, USA. *Chemical Geology*, 2001, vol. 174, no. 4, pp. 445–461. Available at: [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(00\)00289-8](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(00)00289-8) (accessed 15 December 2020).
53. Martos-Villa R., Mata M.P., Williams L.B., Nieto F., Rey X.A., Sainz-Diaz C.I. Evidence of hydrocarbon-rich fluid interaction with clays: clay mineralogy and boron isotope data from Gulf of Cadiz Mud Volcano Sediments. *Minerals*, 2020, vol. 10, no. 8, pp. 1–25. Available at: <https://doi.org/10.3390/min10080651> (accessed 15 December 2020).
54. You C.F., Gieskes J.M. Hydrothermal alteration of hemi-pelagic sediments – experimental evaluation of geochemical processes in shallow subduction zones. *Applied Geochemistry*, 2001, vol. 16, pp. 1055–1066. Available at: [https://doi.org/10.1016/S0883-2927\(01\)00024-5](https://doi.org/10.1016/S0883-2927(01)00024-5) (accessed 15 December 2020).

Received: 31 December 2020.

Information about the authors

Olga A. Nikitenko, researcher, Institute Marine Geology and Geophysics Far Eastern Branch Russian Academy of Science.

Valery V. Ershov, Cand. Sc., leading researcher, Institute Marine Geology and Geophysics Far Eastern Branch Russian Academy of Science.

УДК 532.546

ТЕПЛОБМЕН ПРИ ФИЛЬТРАЦИИ ЖИДКОСТИ В КОЛЬЦЕВОМ КАНАЛЕ, ЗАПОЛНЕННОМ ПОРИСТОЙ СРЕДОЙ

Дехтярь Руслан Анатольевич,
dekhtyar@itp.nsc.ru

Институт теплофизики СО РАН,
Новосибирск, Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 1.

Актуальность работы обусловлена широким использованием пористых сред как при проектировании и оптимизации компактных теплообменников, так и в инженерных расчётах характеристик теплообмена в каналах с зернистой средой и при обтекании тел, погруженных в пористую среду.

Цель: экспериментальное исследование процесса переноса тепла от стенки кольцевого канала к фильтрующей через пористую вставку жидкости при различных режимах течения; получение полуэмпирических корреляций для теплообмена в инерционном режиме фильтрации жидкости в кольцевом канале.

Объект: кольцевой канал с пористой вставкой, состоящей из стеклянных шариков одного диаметра с разными типами как регулярных, так и хаотических упаковок.

Методы: экспериментальные методы поиска закономерностей процессов теплообмена. В опытах с помощью термопар измерялась температура обогреваемой внешней стенки кольцевого канала в четырех сечениях и температура нагревателя в двух разных точках. Также измерялись температуры на входе в рабочий участок и на выходе из него. Одновременно с тепловыми исследованиями измерялся расход жидкости при фильтрации через пористую вставку. Пористость определялась обычным весовым способом. В специальных тарировочных опытах отдельно определялись тепловые потери рабочего участка. Расчет коэффициента теплоотдачи проводился по подводимому потоку тепла к наружной стенке кольцевого канала с учетом тепловых потерь и по разности измеряемой температуры стенки и среднemasсовой температуры жидкости в данном сечении.

Результаты. Представлены результаты экспериментального исследования теплообмена фильтрационного потока жидкости со стенками кольцевого канала, заполненного пористой средой, при постоянном тепловом потоке на внешней стенке. Исследование проводилось на кольцевых каналах с различной шириной. По ширине канала укладывался или один слой шаров одного диаметра с двумя типами упаковок: кубической и ромбоэдрической, или несколько слоев шаров, но уже с произвольной упаковкой (от 3 до 10 шаров по ширине канала). При обработке экспериментальных данных в качестве определяющего геометрического параметра выбран гидравлический диаметр зерна. Показано, что в зависимости от режима фильтрации через пористую вставку существуют различные законы теплообмена. Так, для турбулентного режима фильтрации полученные данные для теплообмена хорошо обобщаются универсальным «законом двух третей». Приведено сравнение с данными других авторов для теплообмена в кольцевом канале и в круглой трубе. Показано, что в инерционном режиме фильтрации теплообмен соответствует закономерности $Nu \sim Re^{1/2}$.

Ключевые слова:

Фильтрация, теплообмен, пористая среда, кольцевой канал, гидравлический диаметр.

Введение

Изучение процессов передачи тепла при вынужденной конвекции через пористые среды является одним из самых сложных фундаментальных проблем теплофизики. Необходимость изучения и исследования процессов теплопереноса в пористых средах связана с важными инженерными и промышленными приложениями. В этих приложениях решается ряд таких проблем, как интенсификация добычи нефти и газа методами теплового воздействия на продуктивные пласты [1, 2], сбор и удаление разлитой нефти, с фильтрацией и гидрогеологическим моделированием, а также эксплуатация геотермальных источников теплоты. Физическое и численное моделирование применяется как для построения теоретических моделей фильтрации, так и для решения различных задач, в том числе: оценки запасов подземных вод, расчета понижений уровня подземных вод при подтоплении, водоотборе, при создании водохранилищ или от работ оросительных систем [3]. Несомненную ценность имеют эти исследования для геодинамики, а именно для исследования тектоники плит, которая является поверхностным проявлением

тепловой конвекции, происходящей главным образом благодаря действию радиоактивных источников теплоты и охлаждению Земли. Кроме того, не менее важными являются задачи, связанные с сооружением подземных хранилищ, прокладкой теплотрасс и других коммуникаций, в том числе в условиях вечной мерзлоты [4]. Еще одно очень важное приложение, в котором использование пористой среды нашло свое применение при проектировании и совершенствовании компактных и эффективных теплообменников, например, с концентрическими трубами [5], – это традиционная энергетика. В ядерной энергетике широкое применение получили реакторы с шаровыми тепловыделяющими элементами [6–8].

Анализ процессов конвективного переноса в каналах, заполненных пористой средой, существенно усложняется. Это связано с тем, что пористая среда является весьма непростым объектом для исследования. Например, при обтекании отдельных элементов пористой вставки возникают вихревые и струйные течения, усложняющие анализ картины течения или фильтрации жидкости через пористую среду. Существует некоторая неопределенность при выборе ха-

рактерных размеров, а также отмечается резкое различие, например, между теплопроводностью твердого каркаса, составляющего основу пористой среды, и жидкостью, фильтрующейся через эту среду. Это значительно затрудняет обработку опытных данных, поэтому вводится понятие эффективных коэффициентов переноса [9]. Как показали исследования, стенка канала оказывает упорядочивающее воздействие на плотность упаковки зерен в пористой вставке, которая изменяется от 1 на стенке до примерно 0,4 в ядре для хаотической упаковки. Изменение пористости в зависимости от расстояния от стенки приводит к появлению «канального эффекта», то есть к локальному максимуму скорости вблизи стенки [10–13].

Для описания теплообмена в пористых средах в теоретических и расчетных моделях используются традиционные представления о ламинарном и турбулентном пограничных слоях. Полагают, что перенос теплоты происходит за счет смешения струй жидкости при обтекании элементов пористого слоя. Чаще всего рассматривается двухслойная схема процесса, где отдельно выделены пристенная область с линейным профилем температур и шириной не более одного диаметра шарика d и ядро засыпки, где предполагается, что скорость фильтрации постоянна [9]. В самом простом случае при анализе течения в поровом или межзерновом пространстве используется закон сопротивления Дарси:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\mu}{K} u, \quad (1)$$

где p – давление жидкости в пористой среде, Па; μ – динамическая вязкость, Па·с; K – проницаемость пористой среды, м^2 ; u – средняя скорость жидкости; x – вдоль оси, м/с.

При моделировании теплообмена в пористой среде в работах [14, 15] показано, что использование закона Дарси в виде (1) в сочетании с ударным профилем скорости при малых скоростях фильтрации дает хорошие результаты.

В более сложных моделях закон сопротивления Дарси в виде (1) модифицируют, пытаясь учесть вязкое трение на твердых стенках, ограничивающих пористую среду, изменение пористости около стенки, а также инерционные потери давления при высоких скоростях [11, 13, 15–18].

При экспериментальном исследовании теплообмена в пористой среде усилия исследователей чаще всего направлены на получение универсальных зависимостей, которые были бы справедливы в широком диапазоне режимных параметров [12, 19–21]. Методика обработки опытных данных сводится к получению эмпирической зависимости для коэффициента теплоотдачи, зависящего от режимных и геометрических параметров, а также от теплофизических свойств жидкости:

$$\text{Nu} = c \cdot f(d/D) \cdot \text{Re}^n \text{Pr}^m, \quad (2)$$

где f – функция, зависящая от геометрических параметров пористого слоя; d – диаметр шариков, из которых состоит пористая среда; D – диаметр рабочего

канала; показатели степени n и m подбираются из эксперимента. Из анализа большого массива экспериментальных данных разных авторов следует, что показатель n для сопоставимых коэффициентов теплопроводности твердой λ_s и жидкой λ_L фазы может изменяться в разных опытах от 0,6 до 1,0 [22]. Что же касается показателя m в формуле (2), то и тут нет особой ясности. Так, из анализа опытных данных работ разных авторов следует, что величина m может изменяться от 1/3 до 2/3. При расчете по формуле (2) и обработке опытных данных существует неопределенность при выборе в качестве характерного масштаба длины при вычислении безразмерных параметров Nu и Re – это может быть диаметр трубы D , диаметр элемента пористой среды d или эквивалентный (гидравлический) диаметр d_e .

Следует отметить еще то, что для рассматриваемой в настоящей работе теплоотдачи в кольцевом канале в зависимости от режима фильтрации существуют различные законы теплоотдачи к стенке трубы по аналогии с круглой трубой [23, 24]. При увеличении числа Рейнольдса изменяется не только картина течения жидкости, но при двухслойном характере теплопереноса происходит перераспределение вкладов ядра потока и пристенной зоны в суммарное термическое сопротивление [4, 23, 25]. При этом необходимо учитывать то обстоятельство, что пристенная зона характеризуется упорядоченной или регулярной упаковкой, а также повышенной пористостью.

Таким образом, исследование теплоотдачи в кольцевом канале с возможностью варьирования количества шаров в поперечном сечении кольцевого канала вплоть до одного является наиболее привлекательным и удобным способом для выяснения влияния роли ядра потока и пристенной зоны.

Методика эксперимента

На рис. 1 приведена схема экспериментального стенда, представляющего собой замкнутый циркуляционный контур. Рабочая жидкость с помощью центробежного насоса – 5 из бака – 4 подавалась в рабочий участок – 1. После прохождения рабочего участка жидкость поступала в расходомерный участок – 2, охлаждалась в кожухотрубном теплообменнике – 3 и возвращалась в бак – 4. Для поддержания постоянного расхода через пористую среду при малых скоростях фильтрации использовалась байпасная линия – 6. Расход жидкости варьировался от 0,007 до 0,4 кг/с.

На рис. 2 приведена схема рабочего участка, который был изготовлен из медной цилиндрической трубы – 1 внутреннего диаметра $D_2=52$ мм с толщиной стенки 1,6 мм. На наружную стенку трубы была наклеена слюда в два слоя, а уже на нее намотан проволочный нихромовый электрический нагреватель – 4, который был подключен к источнику постоянного тока. С помощью этого источника регулировалась мощность нагревателя и количество подведенного тепла к стеке трубы. Чтобы уменьшить тепловые потери в окружающую среду электронагреватель был изолирован слоем тепловой изоляции – 6. Для создания кольцевого канала внутрь медной трубы поме-

щался специально изготовленный центральный вытеснитель – 2 из тонкостенной стеклянной трубки, заполненной воздухом и запаянной с обеих сторон. Конфигурация вытеснителя имела хорошо обтекаемые формы. Таким образом, на внешней стенке центрального вытеснителя выполнялось условие адиабатичности, а на внешней стенке медной трубы – постоянство теплового потока. Длина рабочего участка составила 131 мм, а длина обогреваемого участка – 125 мм.

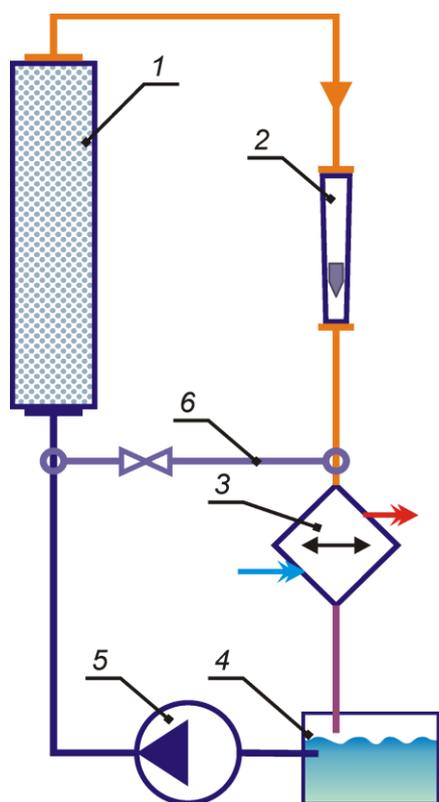


Fig. 1. Schematic of the experimental installation: 1 – working section; 2 – flow-meter section; 3 – heat exchanger; 4 – tank; 5 – pump; 6 – bypass line

Fig. 1. Schematic of the experimental installation: 1 – working section; 2 – flow-meter section; 3 – heat exchanger; 4 – tank; 5 – pump; 6 – bypass line

Кольцевой канал заполнялся стеклянными шариками диаметром $d=8,9$ мм. При этом был выбран наружный диаметр центрального вытеснителя $D_1=34$ мм с тем, чтобы по ширине кольцевого канала мог поместиться только один шарик. В таком канале были реализованы два типа регулярных упаковок: кубическая и ромбоэдрическая. Таким образом, была сформирована однослойная упаковка шариков с заданными шириной канала и диаметром шариков.

Кольцевой канал также заполнялся стеклянными шариками диаметром $d=3,2$ и $0,9$ мм. При этом был выбран наружный диаметр центрального вытеснителя $D_1=30$ мм для $d=3,2$ мм и $D_1=42$ мм для $d=0,9$ мм с тем, чтобы по ширине кольцевого канала помещалось от 3 до 10 шариков соответственно. При такой укладке шаров в кольцевом канале была реализована хаотическая или нерегулярная упаковка.

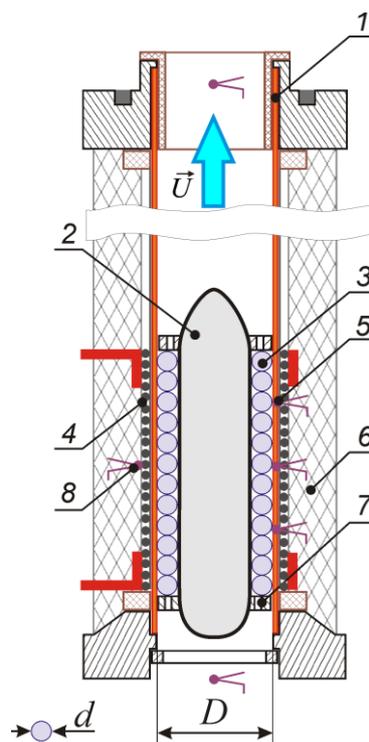


Fig. 2. Diagram of the working section: 1 – copper pipe; 2 – central displacer; 3 – porous medium; 4 – heater; 5 – copper-constantan thermocouples; 6 – heat insulation layer; 7 – grid; 8) nichrome-constantan thermocouples

Fig. 2. Diagram of the working section: 1 – copper pipe; 2 – central displacer; 3 – porous medium; 4 – heater; 5 – copper-constantan thermocouples; 6 – heat insulation layer; 7 – grid; 8) nichrome-constantan thermocouples

Для регулярных и хаотических упаковок шариков весовым способом была измерена пористость ϵ . В результате измерений было получено, что для шариков диаметром $d=8,9$ мм пористость $\epsilon=0,47$ (кубическая упаковка) и $\epsilon=0,41$ (ромбоэдрическая упаковка); для шариков диаметром $d=3,2$ мм пористость $\epsilon=0,36$; для шариков диаметром $d=0,9$ мм пористость $\epsilon=0,38$.

После заполнения канала шариками – 3 (рис. 2) пористый слой жестко фиксировался решетками – 7, которые были установлены как на входе, так и на выходе из рабочего участка.

С помощью четырех медно-константановых термопар – 5 с диаметром проволок 0,18 и 0,1 мм, соответственно, измерялась температура стенки трубы. Нихром-константановыми термопарами – 8 с диаметром проволок 0,1 мм в двух разных точках измерялась температура нагревателя. Такими же термопарами измерялись температуры на входе в рабочий участок и на выходе из него. После обогреваемого участка с пористой вставкой был установлен смесительный участок, состоящий из четырех медных дисков с отверстиями, разделенных кольцевыми прокладками. Это устройство обеспечивало равномерное перемешивание нагретой рабочей жидкости после выхода из обогреваемого рабочего участка. Контроль за качеством работы смесителя осуществлялся при помощи

двух нихром-константановых термопар с диаметром проволоки 0,1 мм. Термопары располагались в одном поперечном сечении: одна термопара – точно на оси трубы, а другая – на расстоянии 5 мм от стенки трубы. Опыты показали, что разность показаний термопар, расположенных после смесителя, не превышала 0,1 °С, что свидетельствовало о том, что степень перемешивания жидкости таким простым устройством была очень эффективной. Все используемые в экспериментах термопары были откалиброваны с точностью в пределах ±0,1 °С.

В специальных тарировочных опытах определялись тепловые потери с наружной поверхности рабочего участка. Коэффициент теплоотдачи рассчитывался по подводимому потоку тепла к наружной стенке кольцевого канала за вычетом теплопотерь и по разности измеряемой температуры стенки и среднекалориметрической температуры рабочей среды в данном сечении.

Одновременно с термопарными измерениями измерялся расход жидкости, фильтрующейся через пористую вставку в кольцевом канале. В качестве рабочей жидкости использовалась дистиллированная вода.

Результаты и обсуждения

Исследовался теплообмен при течении рабочей жидкости (воды) в кольцевом канале с шаровой засыпкой из стеклянных шариков с теплопроводностью, близкой к теплопроводности воды для граничного условия $q_w = \text{const}$. Обсуждаемые ниже результаты относятся к стабилизированному участку теплообмена при постоянном тепловом потоке на внешней стенке и отсутствии отвода тепла на внутренней стенке кольцевого канала.

Эксперименты проводились в кольцевом канале, заполненном пористой средой, как с регулярной упаковкой (кубической и ромбоэдрической), состоящей из одного слоя шаров диаметром $d=8,9$ мм, так и с нерегулярной упаковкой, состоящей из нескольких слоев шаров, помещающихся в кольцевом зазоре (с шариками диаметра $d=3,2$ и $0,9$ мм).

На рис. 3 представлены опытные данные для кольцевого канала, заполненного шариками с $d=8,9$ мм (кубическая и ромбоэдрическая упаковки), 3,2 и 0,9 мм (хаотическая упаковка). Из рисунка видно, что в турбулентном режиме фильтрации ($Re_e > 70$) данные по теплообмену в кольцевом канале с однослойной кубической и ромбоэдрической упаковкой шаров с $d=8,9$ мм хорошо согласуются между собой. Экспериментальные результаты полностью соответствуют универсальному «закону степени 2/3», на который было указано в работах [23, 24]. В этих же работах было показано, что в зависимости от режима фильтрации через пористую вставку существуют различные законы теплообмена. В результате исследований было выделено три режима фильтрации: инерционный, переходный и турбулентный.

В терминах эквивалентных характерных масштабов этот универсальный закон может быть записан в следующем виде:

$$Nu_e = 0,27 \cdot Re_e^{2/3} \cdot Pr^{0,4}, \quad (3)$$

где $Nu_e = \alpha \cdot d_e / \lambda_L$, $Re_e = U \cdot d_e / (\nu)$, $U = u \cdot \varepsilon$ – истинная скорость,

$$d_e = d \cdot \frac{\varepsilon}{1,5 \cdot (1 - \varepsilon) + d/D}, \quad (4)$$

где d_e – гидравлический диаметр, который подсчитан с учетом площади стенок, для кольцевого канала $D = D_2 - D_1$, а для круглой трубы $D = D_2$. Для трубы с большим количеством шаров по сечению d_e обычно рассчитывают по формуле:

$$d_e = \frac{2}{3} \cdot \frac{\varepsilon}{1 - \varepsilon} \cdot d.$$

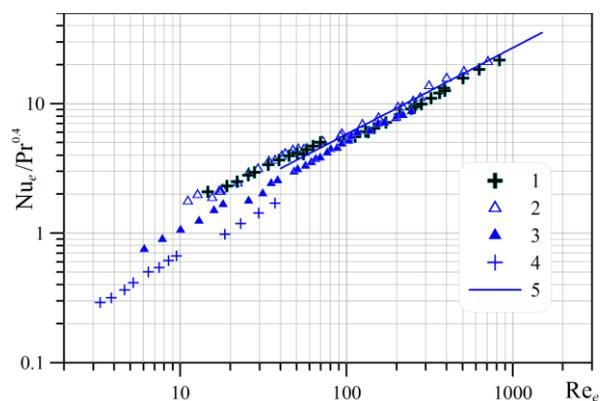


Рис. 3. Теплоотдача в кольцевом канале: 1) $d=8,9$ мм, $D_1=34$ мм (кубическая упаковка); 2) $d=8,9$ мм, $D_1=34$ мм (ромбоэдрическая упаковка); 3) $d=3,2$ мм, $D_1=30$ мм (хаотическая упаковка); 4) $d=0,9$ мм, $D_1=42$ мм (хаотическая упаковка); 5) эмпирическая зависимость $Nu_e = 0,27 Re_e^{2/3} Pr^{0,4}$

Fig. 3. Heat transfer in the annular channel: 1) $d=8,9$ mm, $D_1=34$ mm (cubic packing); 2) $d=8,9$ mm, $D_1=34$ mm (rhombohedral packing); 3) $d=3,2$ mm, $D_1=30$ mm (random packing); 4) $d=0,9$ mm, $D_1=42$ mm (random packing); 5) empirical dependence $Nu_e = 0,27 Re_e^{2/3} Pr^{0,4}$

Из рис. 3 также видно, что при турбулентной фильтрации ($Re_e > 70$) в кольцевом канале через пористую вставку с шариками $d=3,2$ мм (хаотическая упаковка шаров) также реализуется универсальный «закон двух третей» для теплоотдачи. Но как видно из рисунка, экспериментальные точки на графике лежат примерно на 10 % ниже эмпирической зависимости (3) – сплошная линия 5. Можно добиться совпадения экспериментальных точек с эмпирической зависимостью, записанной в виде (3), если принять во внимание то, что по сечению канала укладывалось не более трех шаров, а при пересчете чисел Nu и Re вместо скорости фильтрации взять истинную скорость, соответствующую кубической упаковке.

На рис. 4 представлены результаты измерения безразмерного коэффициента теплоотдачи как в кольцевом канале, так и в круглой трубе с пористой вставкой в зависимости от числа Рейнольдса [23]. Приведено сопоставление экспериментальных данных, полученных при фильтрации воды через стеклян-

ные шарики, помещённые в кольцевой канал, с данными работы [26]. В качестве характерного масштаба длины, обобщающего данные и для трубы, и для кольцевого канала, выбран гидравлический диаметр, представленный по формуле (4) и характеризующий размер межзернового пространства. Из анализа результатов, представленных на этом рисунке следует, что при турбулентной фильтрации жидкости через пористые вставки в трубе и кольцевом канале теплообмен соответствует универсальному закону (3). Из рис. 4 хорошо видно, что можно выделить диапазоны чисел Рейнольдса, при которых экспериментальные данные по теплоотдаче, как в круглом, так и в кольцевом канале с одним слоем шаров регулярной и хаотической упаковки, могут быть аппроксимированы закономерностью вида: $Nu_e \sim Re_e^{1/2}$ (на рис. 4 – пунктирные линии 9).

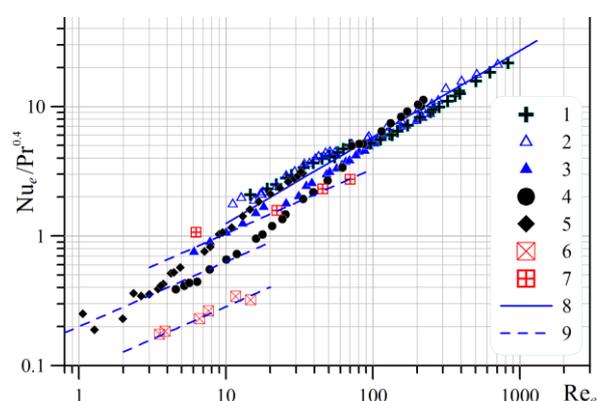


Рис. 4. Теплоотдача в кольцевом канале (1–3, 6, 7) и в круглой трубе (4, 5): 1) $d=8,9$ мм (кубическая упаковка); 2) $d=8,9$ мм (ромбоэдрическая упаковка); 3) $d=3,2$ мм (хаотическая упаковка), данные настоящей работы; 4, 5) $d=3,2$ мм (данные из [23] для фильтрации воды и 47 % раствора глицерина, $D_2=52$ мм); 6, 7) $d=0,7$ и $2,5$ мм (данные из [26], $D_1=9,5$ мм, $D_2=28$ мм, $D_1=9,5$ мм); 8) эмпирическая зависимость $Nu_e=0,27Re_e^{2/3}Pr^{0,4}$; 9) закономерность $Nu_e \sim Re_e^{1/2}$

Рис. 4. Heat transfer in the annular channel (1–3, 6, 7) and in the round tube (4, 5): 1) $d=8,9$ mm (cubic packing); 2) $d=8,9$ mm (rhombohedral packing); 3) $d=3,2$ mm (random packing), data of this work; 4, 5) $d=3,2$ mm (data of work [23] to filter water and 47 % glycerin solution); 6, 7) data of work [26], $d=0,7$ mm, $d=2,5$ mm, respectively, $D_1=9,5$ mm, $D_2=28$ mm; 8) empirical dependence $Nu_e=0,27Re_e^{2/3}Pr^{0,4}$; 9) regularity $Nu_e \sim Re_e^{1/2}$

Как видно из рисунка, экспериментальные данные в области инерционного режима фильтрации при такой обработке расслаиваются. Поэтому для обобщения данных в области чисел Рейнольдса $Re_e < 70$, соответствующих инерционному режиму фильтрации, предлагается эмпирическая зависимость в следующем виде:

$$Nu_e = C \cdot (d_e/D) \cdot Re_e^{1/2} \cdot Pr^{1/2}, \quad (5)$$

где C – константа эксперимента.

На рис. 5, 6 представлены основные результаты обработки опытных данных для общего коэффициен-

та теплоотдачи на стабилизированном участке теплообмена в кольцевом канале и в круглой трубе.

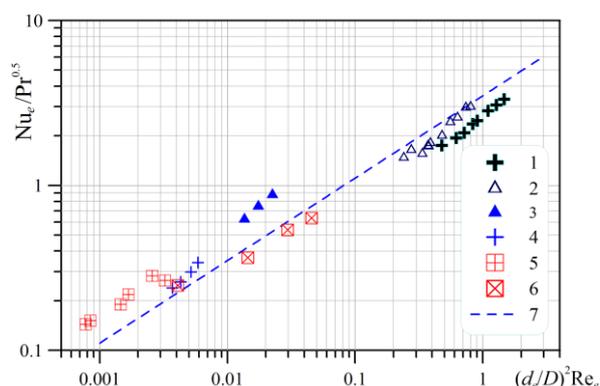


Рис. 5. Теплоотдача в кольцевом канале, соответствующая инерционному режиму течения жидкости: 1) $d=8,9$ мм (кубическая упаковка); 2) $d=8,9$ мм (ромбоэдрическая упаковка); 3) $d=3,2$ мм (хаотическая упаковка), данные настоящей работы; 4) $d=0,9$ мм (хаотическая упаковка); 5) $d=0,7$ мм; 6) $d=2,5$ мм (данные из работы [26], $D_1=9,5$ мм, $D_2=28$ мм); 7) закономерность $Nu_e \sim Re_e^{1/2}$

Fig. 5. Heat transfer in the annular channel corresponding to the inertial regime of fluid flow: 1) cubic packaging, $d=8,9$ mm; 2) rhombohedral packaging, $d=8,9$ mm; 3) chaotic packaging, $d=3,2$ mm; 4) chaotic packaging, $d=0,9$ mm (data of this work); 5, 6) data of work [26] $d=0,7$ mm, $d=2,5$ mm ($D_1=9,5$ mm, $D_2=28$ mm); 7) regularity $Nu_e \sim Re_e^{1/2}$

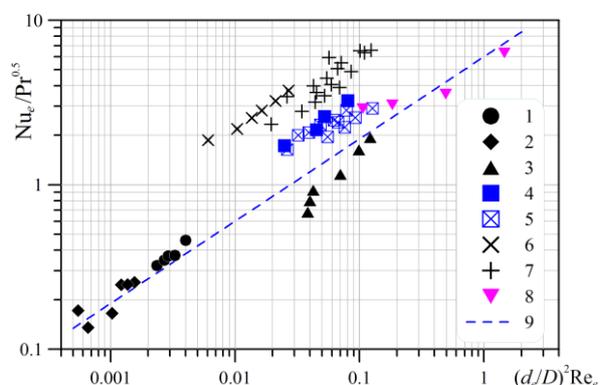


Рис. 6. Теплоотдача в круглой трубе при инерционном режиме фильтрации жидкости: 1) $d/D=0,062$ (вода); 2) $d/D=0,062$ (47 % раствор глицерина); 3) $d/D=0,17$ (вода, данные из работы [23]); 4) $d/D=0,07$ (воздух); 5) $d/D=0,11$ (воздух, данные из работы [19]); 6) $d/D=0,04$ (воздух); 7) $d/D=0,07$ (воздух, данные из работы [27]); 8) $d/D=0,098$ (вода, данные из работы [28]); 9) закономерность $Nu_e \sim Re_e^{1/2}$

Fig. 6. Heat exchange in a pipe with inertial filtration of liquid: 1) $d/D=0,062$ (water); 2) $d/D=0,062$ (47 % glycerol solution); 3) $d/D=0,17$ (water, data from the work of [23]); 4) $d/D=0,07$ (air); 5) $d/D=0,11$ (air, data from the work of [19]); 6) $d/D=0,04$ (air); 7) $d/D=0,07$ (air, data from the work of [27]); 8) $d/D=0,098$ (water, data from the work of [28]); 9) regularity $Nu_e \sim Re_e^{1/2}$

Из рисунков видно, что при инерционном режиме фильтрации жидкости экспериментальные данные разных авторов хорошо соответствуют зависимости вида (5).

Рассматриваемую область чисел Рейнольдса квалифицируют как соответствующую инерционному режиму фильтрации, тем самым подчеркивая преобладающую роль инерционных сил и указывая на нелинейный характер закона сопротивления [23]. В этой области роль ядра потока становится преобладающей, а механизм процессов теплопереноса принципиальным образом отличается от механизма теплообмена в области турбулентной фильтрации.

Анализ опытных данных других авторов показывает, что результаты измерений среднего коэффициента теплоотдачи могут различаться в разы [22, 29], что связано, скорее всего, с погрешностями в измерениях температуры рабочей жидкости на выходе из пористой вставки, а также с использованием длинных рабочих каналов. Из-за малых разностей измеряемой температуры стенки и температуры жидкости происходит резкое увеличение погрешностей измеряемых и вычисляемых величин. Следует также иметь в виду, что при малых числах Рейнольдса Re_e и умеренных числах Прандтля Pr коэффициент теплопроводности каркаса пористой среды становится существенной величиной. Поэтому методически бывает трудно сделать оценку вклада пристенной зоны в общий коэффициент теплоотдачи.

Известно, что при массообмене сопротивление переносу вещества сосредоточено в основном у стенки канала из-за высоких значений числа Шмидта Sc . Поэтому в области невысоких чисел Рейнольдса Re_e , соответствующих инерционному режиму течения, результаты измерения пристенного коэффициента массопереноса на стенке канала с пористой средой наиболее надежные и достоверные. Например, авторами работы [30] была предложена следующая эмпирическая корреляция:

$$Nu_e = A \cdot Re_e^{1/2} \cdot Sc^{1/3}, \quad (6)$$

справедливая в узком диапазоне чисел Рейнольдса $Re_e=1 \dots 40$, где константа пропорциональности A зависит от условий проведения экспериментов и геометрических параметров. В таком случае можно производить расчет теплообмена по зависимостям, полученным из экспериментов по массообмену. Тогда необходимо принимать во внимание то обстоятельство, что при расчете не будут учтены некоторые

важные факторы, влияющие на итоговую величину коэффициента теплоотдачи: дополнительное термическое сопротивление контакта шариков со стенками трубы, теплопроводность шаровой засыпки и другие факторы. Следовательно, такие расчеты могут привести к несколько заниженным значениям коэффициента теплоотдачи.

Сопоставление эмпирической корреляции, записанной в виде (6) и полученной для пристенного теплообмена, с закономерностями, следующими из результатов исследования теплоотдачи в кольцевом канале для диапазона чисел Рейнольдса Re_e , предшествующих турбулентной фильтрации в кольцевом канале и в трубе (рис. 5, 6), позволяет сделать вывод об аналогии процессов переноса как в пристенной зоне, так и в ядре потока.

Таким образом, любая оценка вклада пристенной зоны в суммарный теплообмен в пористой среде, проведенная с использованием эмпирических корреляций, будет всегда ограниченной. Это связано с тем, что существуют ограничения в выборе рабочих жидкостей, условий проведения экспериментов и так далее. Поэтому необходимо проведение дополнительных детальных исследований, направленных на выявление роли ядра потока и пристенной зоны при рассмотрении двухслойной схемы процесса, чтобы иметь более определенное представление об основных механизмах переноса тепла в пористых и зернистых средах.

Заключение

На основании проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

- 1) теплоотдача от поверхности трубы, заполненной зернистым слоем, в режиме турбулентной фильтрации определяется закономерностями, присутствующими в пристенной зоне, и подчиняется универсальному «закону двух третей» в форме (3);
- 2) в инерционном режиме фильтрации характер процессов переноса в ядре и в пристенной зоне одинаков, теплоотдача подчиняется закономерности $Nu_e \sim Re_e^{1/2}$;
- 3) необходимы детальные экспериментальные исследования, чтобы установить критерии, определяющие смену режимов теплообмена, характеризующие геометрию задачи, влияние физических свойств и параметров течения.

Работа выполнена в рамках проекта по госзаданию № 121031800213-0.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мусакаев Н.Г., Бородин С.Л. Расчет термодинамических параметров опускного течения теплоносителя в скважине с учетом протаивания многолетнемерзлых пород // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 3. – С. 135-144.
2. Сохошко С.К. Учет изменения закона фильтрации при расчете дебита газовой скважины // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 12. – С. 77–83.
3. Исследование процессов фильтрации воды в пористой среде методами физического и численного моделирования /

- К.В. Белов, А.Б. Лисенков, А.Д. Пономарёв, Н.С. Горбатенко // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2017. – Т. 328. – № 8. – С. 64–74.
4. Halkarni S.S., Sridharan A., Prabhu S.V. Experimental investigation on effect of random packing with uniform sized spheres inside concentric tube heat exchangers on heat transfer coefficient and using water as working medium // International Journal of Thermal Sciences. – 2018. – V. 133. – P. 341–356.
5. Проблемы контроля фильтрации вод через гидротехнические сооружения в условиях вечной мерзлоты / Н.В. Юркевич, Н.В. Юркевич, В.Н. Гуреев, Н.А. Мазов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 4. – С. 126–138.

6. Богоявленский Р.Г. Гидродинамика и теплообмен в высокотемпературных ядерных реакторах с шаровыми твэлами. – М.: Атомиздат, 1978. – 112 с.
7. Сорокин В.В. Гидравлика и теплообмен шаровых засыпок в условиях активной зоны водо-водяных ядерных реакторов с микротвэлами. – Минск: Беларус. навука, 2010. – 193 с.
8. Экспериментальное исследование и численное моделирование гидродинамики и теплообмена в шаровых засыпках / А.В. Бороздин, А.Н. Варава, А.В. Дедов, А.Т. Комов, С.А. Малаховский, Ю.В. Сморгочкова // Тепловые процессы в технике. – 2015. – Т. 7. – № 7. – С. 295–300.
9. Экспериментальное исследование теплопереноса в шаровой засыпке / А.А. Авдеев, Б.Ф. Балунов, Ю.Б. Зудин, Р.А. Рыбин // Теплофизика высоких температур. – 2009. – Т. 47. – № 5. – С. 724–733.
10. Lerou J.J., Froment G.F. Velocity, temperature and conversion profiles in fixed bed catalytic reactors // Chemical Engineering Science. – 1977. – V. 32. – Iss. 8. – P. 853–861.
11. Vafai K. Convective flow and heat transfer in variable-porosity media // Journal of Fluid Mechanics. – 1984. – V. 147. – P. 233–259.
12. Poulikakos D., Renken K. Forced convection in a channel filled with porous medium, including the effects of flow inertia, variable porosity, and Brinkman friction // Journal of Heat Transfer. – 1987. – V. 109. – P. 880–888.
13. Гольдштик М.А. Процессы переноса в зернистом слое. 2-е изд., перераб. и доп. / отв. ред. Н.И. Яворский. – Новосибирск: Изд-во Института теплофизики СО РАН, 2005. – 358 с.
14. Li C.-H., Finlayson B.A. Heat transfer in packed beds – a reevaluation // Chemical Engineering Science. – 1977. – V. 32 (9). – P. 1055–1066.
15. Vafai K., Tien C.L. Boundary and inertia effects on flow and heat transfer in porous media // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 1981. – V. 24. – Iss. 2. – P. 195–203.
16. Lee D.Y., Vafai K. Analytical characterization and conceptual assessment of solid and fluid temperature differentials in porous media // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 1999. – V. 42. – P. 423–435.
17. Теплицкий Ю.С. О теплообмене в трубе, заполненной зернистым слоем // Инженерно-физический журнал. – 2004. – Т. 77. – № 1. – С. 86–92.
18. Сираев Р.Р. Фильтрация жидкости в пористой среде Форцгеймера с пространственно неоднородными пористостью и проницаемостью // Вычислительная механика сплошных сред. – 2019. – Т. 12. – № 3. – С. 281–292.
19. Yagi S., Kunii D. Studies on heat transfer in packed beds // International Development in Heat Transfer. – 1961. – Pt. IV. – P. 750–759.
20. Storck A., Coeuret F. Mass transfer between a flowing liquid and a wall or an immersed surface in fixed and fluidized beds // Chemical Engineering Journal. – 1980. – V. 20. – P. 149–156.
21. Kays W.M., London A.L. Compact heat exchangers. – New York: McGraw Hill, 1984. – 352 p.
22. Wakao N., Kagueli S., Funazkri T. Effect of fluid dispersion coefficients on particle-to-fluid heat transfer coefficients in packed beds: correlation of Nusselt numbers // Chemical Engineering Science. – 1979. – V. 34 (3). – P. 325–336.
23. Теплообмен в зернистом слое при умеренных числах Рейнольдса / Р.А. Дехтярь, Д.Ф. Сиковский, А.В. Горин, В.А. Мухин // Теплофизика высоких температур. – 2002. – Т. 40. – № 5. – С. 748–755.
24. Dekhtyar R.A., Ovchinnikov V.V. An experimental study of hydrodynamics and heat transfer at fluid filtration through a porous medium // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – 1359. – 012122.
25. Melanson M.M., Dixon A.G. Solid conduction in low dt/dp beds of spheres, pellets and rings // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 1985. – V. 28. – P. 383–394.
26. Wang B.-X., Du J.-H. Forced convection heat transfer in a vertical annulus filled with porous media // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 1993. – V. 36. – № 17. – P. 4207–4213.
27. Verschoor H., Schuit G.C.A. Heat transfer to fluids flowing through a bed of granular solids // Applied Scientific Research. – 1951. – A2. – P. 97–119.
28. Nilles M., Martin H. Heat transfer at the wall of packed beds // Proc. 9th International Heat Transfer Conference. – New York: Hemisphere Publishing, 1990. – P. 255–260.
29. Аэров М.Е., Тодес О.М. Гидравлические и тепловые основы работы аппаратов со стационарным зернистым слоем. – Л.: Химия, 1968. – 510 с.
30. Yagi S., Wakao N. Heat and mass transfer from wall to fluid in packed beds // American Institute of Chemical Engineering Journal. – 1959. – V. 5. – № 1. – P. 79–85.

Поступила 02.08.2021 г.

Информация об авторах

Дехтярь Р.А., кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт теплофизики СО РАН.

DK 532.546

HEAT TRANSFER DURING LIQUID FILTRATION IN AN ANNULAR CHANNEL FILLED WITH POROUS MEDIUM

Ruslan A. Dekhtyar,
dekhtyar@itp.nsc.ru

S.S. Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS,
1, Academician Lavrentiev avenue, Novosibirsk, 630090, Russia.

The relevance of the work is caused by the wide use of porous media, both in the design and optimization of compact heat exchangers and in the engineering calculations of the characteristics of heat and mass transfer in the channels with a grainy medium and when flowing around the bodies immersed in the porous medium.

The main aim of the research is the experimental study of heat transfer in an annular channel filled with a granular medium at various modes of liquid filtration; to obtain semi-empirical correlations for heat transfer in the inertial mode of fluid filtration in an annular channel.

Objects: annular channel with a porous insert consisting of glass beads of the same diameter with different types of both regular and chaotic packings.

Methods: experimental methods for finding the patterns of heat exchange processes. In experiments, using thermocouples, the temperature of the heated outer wall of the annular channel was measured in four sections and the temperature of the heater at two different points. The temperatures at the inlet to the working station and at the output of it were measured as well. Simultaneously with thermal investigation, the fluid flow was measured when filtering through a porous insert. Porosity was determined by the usual weighty way. In special calibration experiments, the heat losses of the working section were determined separately. The calculation of the heat transfer coefficient was carried out according to the flow of heat to the outer wall of the annular channel, taking into account heat losses and, along the difference in the measured wall temperature and the medium-mass fluid temperature in this section.

The paper introduces the results of the experimental study of liquid filtration flow heat exchange with the walls of the annular channel filled with a porous medium at constant heat flux on the outer wall. The study was conducted on ring channels with different widths. The width of the channel was laid either one layer of the balls of one diameter with two types of packages: cubic and rhombohedral, or several layers of balls, but already with arbitrary packaging (from 3 to 10 ball width). When processing the experimental data, hydraulic grain diameter is selected as the determining geometric parameter. It is shown that, depending on the filtration mode, various laws of heat exchange exist through a porous insert. So for the turbulent filtering mode, the obtained data for heat exchange is well summarized by the universal «law of two-thirds». The paper introduces the comparison with the data of other authors, both for heat exchange in the annular channel and in a round tube. It is shown that in the inertial mode of filtration, the heat exchange corresponds to the regularity of $Nu \sim Re^{1/2}$.

Key words:

Filtration, heat exchange, porous media, annular channel, hydraulic diameter.

The research was carried out within the project of the State Task no. 121031800213-0.

REFERENCES

- Musakaev N.G., Borodin S.L. Calculation of thermodynamic parameters of the heat transfer agent downward flow in a well, taking into account permafrost melting. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 3, pp. 135–144. In Rus.
- Belov K.V., Lisenkov A.V., Ponomarev A.D., Gorbatenko N.S. Study of fluid filtration in a porous medium using physical and numerical modeling. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 8, pp. 64–74. In Rus.
- Sokhoshko S.K. Accounting for changes in the filtration law when calculating the flow rate of a gas well. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 12, pp. 77–83. In Rus.
- Halkarni S.S., Sridharan A., Prabhu S.V. Experimental investigation on effect of random packing with uniform sized spheres inside concentric tube heat exchangers on heat transfer coefficient and using water as working medium. *International Journal of Thermal Sciences*, 2018, vol. 133, pp. 341–356.
- Yurkevich N.V., Yurkevich N.V., Gureyev V.N., Mazov N.A. Problems of controlling water filtration in hydraulic structures in permafrost regions. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 4, pp. 126–138. In Rus.
- Bogoyavlenskii R.G. *Gidrodinamika i teploobmen v vysokotemperaturnykh yadernykh reaktorakh s sharovymi tvelami* [Hydrodynamics and heat exchange in the high-temperature nuclear reactors with pebble bed]. Moscow, Atomizdat Publ., 1978. 112 p.
- Sorokin V.V. *Gidravlika i teploobmen sharovykh zasypok v usloviyakh aktivnoy zony vodo-vodyanykh yadernykh reaktorov s mikrotvelami* [Hydraulics and heat exchange of ball fillings in conditions of the active zone of water-water nuclear reactors with micro heat highlighting element]. Minsk, Belarus nauka Publ., 2010. 193 p.
- Borozdin A.V., Varava A.N., Dedov A.V., Komov A.T., Malahovskiy S.A., Smorchkova Yu.V. Eksperimentalnoe issledovanie i chislennoe modelirovanie gidrodinamiki i teploobmena v sharovykh zasypkakh [Experimental study and numerical simulation of fluid flow and heat transfer in the pebble bed]. *Teplovyte protsessy v tekhnike*, 2015, vol. 7, no. 7, pp. 295–300.
- Avdeev A.A., Zudin Yu.B., Balunov B.F., Rybin R.A. An experimental investigation of heat transfer in a pebble bed. *High Temperature*, 2009, vol. 47, no. 5, pp. 692–700.
- Lerou J.J., Froment G.F. Velocity, temperature and conversion profiles in fixed bed catalytic reactors. *Chemical Engineering Science*, 1977, vol. 32, Iss. 8, pp. 853–861.
- Vafai K. Convective flow and heat transfer in variable-porosity media. *Journal of Fluid Mechanics*, 1984, vol. 147, pp. 233–259.
- Poulikakos D., Renken K. Forced convection in a channel filled with porous medium, including the effects of flow inertia, variable porosity, and Brinkman friction. *Journal of Heat Transfer*, 1987, vol. 109, pp. 880–888.
- Goldshchik M.A. *Protsessy perenosa v zemistom sloe* [Transfer processes in the granular layer]. Novosibirsk, SO RAN Publ., 2005. 358 p.
- Li C.-H., Finlayson B.A. Heat transfer in packed beds – a reevaluation. *Chemical Engineering Science*, 1977, vol. 32 (9), pp. 1055–1066.
- Vafai K., Tien C.L. Boundary and inertia effects on flow and heat transfer in porous media. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1981, vol. 24, Iss. 2, pp. 195–203.

16. Lee D.Y., Vafai K. Analytical characterization and conceptual assessment of solid and fluid temperature differentials in porous media. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1999, vol. 42, pp. 423–435.
17. Teplitskii Y.S. Heat exchange in a tube filled with granular bed. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2004, vol. 77 (1), pp. 103–110.
18. Siraev R.R. Filtratsiya zhidkosti v poristoy srede Fortsgeymera s prostranstvenno neodnorodnymi poristostyu i pronitsaemostyu [Filtering of fluid in the porous medium of Fortzimer with spatially inhomogeneous porosity and permeability]. *Vychislitel'naya mekhanika sploshnykh sred*, 2019, vol. 12, no. 3, pp. 281–292.
19. Yagi S., Kunii D. Studies on heat transfer in packed beds. *International Development in Heat Transfer*, 1961, Pt. IV, pp. 750–759.
20. Storck A., Coeuret F. Mass transfer between a flowing liquid and a wall or an immersed surface in fixed and fluidized beds. *Chemical Engineering Journal*, 1980, vol. 20, pp. 149–156.
21. Kays W.M., London A.L. *Compact Heat Exchangers*. New York, McGraw Hill Publ., 1984. 352 p.
22. Wakao N., Kagueli S., Funazkri T. Effect of fluid dispersion coefficients on particle-to-fluid heat transfer coefficients in packed beds: Correlation of Nusselt numbers. *Chemical Engineering Science*, 1979, vol. 34 (3), pp. 325–336.
23. Dekhtyar' R.A., Sikovsky D.Ph., Gorine A.V., Mukhin V.A. Heat transfer in a packed bed at moderate values of the Reynolds number. *High Temperature*, 2002, vol. 40, no. 5, pp. 693–700.
24. Dekhtyar R.A., Ovchinnikov V.V. An experimental study of hydrodynamics and heat transfer at fluid filtration through a porous medium. *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, vol. 1359, 012122.
25. Melanson M.M., Dixon A.G. Solid conduction in low dt/dp beds of spheres, pellets and rings. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1985, vol. 28, pp. 383–394.
26. Wang B-X., Du J-H. Forced convection heat transfer in a vertical annulus filled with porous media. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1993, vol. 36, no. 17, pp. 4207–4213.
27. Verschoor H., Schuit G.C.A. Heat transfer to fluids flowing through a bed of granular solids. *Applied Scientific Research*, 1951, A2, pp. 97–119.
28. Nilles M., Martin H. Heat transfer at the wall of packed beds. *Proceedings 9th International Heat Transfer Conference*. New York, Hemisphere Publishing, 1990. pp. 255–261.
29. Aerov M.E., Todes O.M. *Gidravlicheskie i teplove osnovy raboty apparatov so statsionarnym zernistym sloem* [Hydraulic and thermal bases of apparatuses with stationary grain layers]. Leningrad, Chimiya Publ., 1968. 510 p.
30. Yagi S., Wakao N. Heat and mass transfer from wall to fluid in packed beds. *American Institute of Chemical Engineers Journal*, 1959, vol. 5, no. 1, pp. 79–85.

Received: 2 August 2021.

Information about the authors

Ruslan A. Dekhtyar, Cand. Sc., senior researcher, S.S. Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS.

УДК 622.276.63

АНАЛИТИЧЕСКИЕ СВЯЗИ МЕЖДУ ФИЛЬТРАЦИОННО-ЕМКОСТНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ ПРОДУКТИВНЫХ ПЛАСТОВ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ НА ОСНОВЕ ОБОБЩЕННОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ КАПИЛЛЯРНЫХ КРИВЫХ

Мухаметшин Вячеслав Вячеславович¹,
vv@of.ugntu.ru

Ахметов Расуль Тухбатуллович²,
info@of.ugntu.ru

Кулешова Любовь Сергеевна²,
markl212@mail.ru

Грезина Ольга Анатольевна²,
ugntu.grezina@mail.ru

¹ Уфимский государственный нефтяной технический университет,
Россия, 450064, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1.

² Филиал Уфимского государственного нефтяного технического университета в г. Октябрьском,
Россия, 452607, г. Октябрьский, ул. Девонская, 54а.

Актуальность. Аналитические связи между фильтрационно-емкостными свойствами коллекторов Западной Сибири позволяют оценить проницаемость пласта и потенциальные дебиты скважин. Получение таких многомерных связей на начальном этапе разработки является важной и актуальной задачей. Многомерные связи между фильтрационно-емкостными параметрами коллекторов, предложенные разными исследователями, требуют выбора и адаптации к конкретному объекту. Однако аналитические связи, предлагаемые в настоящей работе, получены на основе анализа поведения кривых капиллярного давления конкретного продуктивного пласта. В данном случае связь автоматически адаптируется к конкретному объекту и по структуре и характеру является оптимальной.

Цель: получить аналитические выражения для многомерных связей между фильтрационными и емкостными свойствами пород-коллекторов на базе анализа и обобщения исследований образцов керн по результатам капилляриметрических исследований. Полученные зависимости должны обеспечить оценку с достаточной для практических целей точностью абсолютной проницаемости пласта и потенциального дебита скважины по известным величинам остаточной водонасыщенности и пористости пласта по данным промысловой геофизики.

Объекты: продуктивные пласты триасового, юрского и нижнемелового возрастов Лас-Еганского и Повховского месторождений.

Методы: статистическая обработка данных образцов керн ряда продуктивных пластов месторождений с использованием капилляриметрических исследований.

Результаты. На основе всестороннего анализа обобщенной математической модели капиллярных кривых разработана методика получения аналитических выражений для многомерных связей между фильтрационными и емкостными параметрами коллекторов Западной Сибири. В работе представлены аналитические выражения, а также графики связей между фильтрационно-емкостными параметрами для Лас-Еганского и Повховского месторождений, которые позволяют оценить абсолютную проницаемость продуктивных пластов по известным значениям пористости и остаточной водонасыщенности. Предлагаемая методика позволяет получить многомерные связи для любого продуктивного пласта в условиях Западной Сибири; в работе показано, что в гидрофильных коллекторах наблюдается наиболее тесная связь между фильтрационно-емкостными свойствами; выявлена причина тесной связи абсолютной проницаемости продуктивных пластов Западной Сибири от остаточной водонасыщенности коллектора.

Ключевые слова:

Капилляриметрия, проницаемость, пористость, остаточная водонасыщенность, структура и характер связи.

Введение

Известно, что в основе интеллектуализации разработки нефтяных месторождений лежит научно-методическая база, которая формируется во многом благодаря анализу и обобщению опыта эксплуатации залежей нефти [1–12]. При этом важное значение имеет получение и анализ таких параметров залежей, как пористость, нефтенасыщенность, проницаемость, а также определение взаимосвязи между ними.

Многомерные зависимости между фильтрационными и емкостными свойствами продуктивных пла-

стов часто используются для оценки проницаемости по известным величинам остаточной водонасыщенности и пористости пластов по данным промысловой геофизики [13–20].

В настоящее время примеров таких зависимостей достаточно много: Вилли-Роуза, Котеса-Дюмануара, Тимура и другие.

При этом для конкретного продуктивного пласта необходимо выбрать подходящую формулу и построить эмпирические зависимости с использованием данных лабораторных исследований керн.

В условиях Западной Сибири для каждого продуктивного пласта проводятся капилляриметрические исследования, а также измеряются значения пористости и абсолютной проницаемости.

Детально рассмотрены вопросы математического моделирования кривых капиллярного давления. Отдельные результаты исследований опубликованы в работах [21–30].

Методы и материалы

Известно, что капиллярные кривые представляют собой зависимости капиллярного давления от водонасыщенности пустотного пространства образцов керн, имеющих различные фильтрационно-емкостные свойства. В силу этого, наряду с зависимостью капиллярного давления от водонасыщенности, они содержат информацию о структуре и характере связей между фильтрационными и емкостными свойствами конкретного продуктивного пласта.

По нашему мнению, связи между фильтрационно-емкостными свойствами, полученные на основе капиллярных исследований, являются оптимальными, поскольку они адаптированы к конкретному продуктивному пласту.

Для аппроксимации капиллярных кривых коллекторов Западной Сибири получено следующее выражение:

$$\ln(pr_0) = a + b \ln(K_B^*) + c \ln^2(K_B^*), \quad (1)$$

где a , b , c – фиксированные коэффициенты; $K_B^* = \frac{K_B - K_{Bo}}{1 - K_{Bo}}$ – нормированная водонасыщенность порового пространства; K_B – общая водонасыщенность; $r_0 = \sqrt{\frac{K_{np}}{K_n}}$ – параметр, имеющий размерность радиуса; K_{np} – коэффициент проницаемости; K_n – коэффициент пористости; p – капиллярное давление.

Определим по формуле (1) начальное капиллярное давление. Для этого в формулу (1) подставим: $K_B^* = 1,0$. Тогда получим:

$$\ln(p_0 r_0) = a, \quad (2)$$

где p_0 – начальное капиллярное давление.

Подставив выражение (2) в формулу (1), получим:

$$\ln\left(\frac{p}{p_0}\right) = b \ln(K_B^*) + c \ln^2(K_B^*). \quad (3)$$

Предположим, что коэффициент c мал и им можно пренебречь, тогда из формулы (3) получим:

$$K_B^* = \left(\frac{p}{p_0}\right)^{\frac{1}{b}}. \quad (4)$$

Таким образом, получаем приближение Брукс–Кори для аппроксимации капиллярных кривых.

В соответствии с формулой (2) начальное капиллярное давление равно:

$$p_0 = \frac{e^a}{r_0} = \frac{e^a}{\sqrt{\frac{K_{np}}{K_n}}}.$$

Формулу (4) перепишем в виде:

$$K_B = K_{Bo} + (1 - K_{Bo}) \left(\frac{p}{p_0}\right)^{\frac{1}{b}}.$$

Далее воспользуемся формулой Лапласа и перейдем к радиусам поровых каналов:

$$K_B = K_{Bo} + (1 - K_{Bo}) \left(\frac{r}{r_m}\right)^{\frac{1}{b}}.$$

Определим плотность распределения поровых каналов по радиусу:

$$g(r) = \frac{dK_B}{dr} = (1 - K_{Bo}) \frac{\alpha}{r_m^\alpha} r^{\alpha-1}, \quad (5)$$

где $\alpha = \frac{1}{b}$, r_m – максимальный радиус поровых каналов, соответствующий начальному капиллярному давлению.

В соответствии с формулой Лапласа имеем:

$$r_m = \frac{2\sigma \cos\theta}{p_0} = \frac{\beta}{e^\alpha} \sqrt{\frac{K_{np}}{K_n}},$$

где $\beta = 2\sigma \cos\theta$; σ – поверхностное натяжение; θ – угол смачивания.

Отметим, что плотность распределения поровых каналов, определенная по формуле (5), описывает плотность распределения эффективных поровых каналов, то есть каналов, по которым происходит движение флюидов.

Рассмотрим модель остаточной водонасыщенности при капилляриметрии.

Поскольку вытеснение воды из поровых каналов при нарастании капиллярного давления происходит лишь по эффективным поровым каналам, то следует полагать, что часть воды в виде пленки остается на поверхности поровых каналов, пересекающих образец породы.

Суммарный объем воды, удерживаемой поверхностью поровых каналов, образует остаточную водонасыщенность пустотного пространства.

Таким образом, сечение капилляров на самом деле несколько больше, поскольку включает в себя толщину пленки остаточной воды (δ).

Тогда для остаточной водонасыщенности имеем следующую формулу:

$$K_{Bo} = \frac{\int_0^{r_m} [\pi(r+\delta)^2 - \pi r^2] g(r) dr}{\int_0^{r_m} \pi(r+\delta)^2 g(r) dr}. \quad (6)$$

Последовательные преобразования формулы (6) дают:

$$K_{Bo} = 1 - \frac{\int_0^{r_m} r^2 g(r) dr}{\int_0^{r_m} (r+\delta)^2 g(r) dr};$$

$$1 - K_{Bo} = \frac{\int_0^{r_m} r^2 g(r) dr}{\int_0^{r_m} (r+\delta)^2 g(r) dr};$$

$$\frac{1}{1 - K_{Bo}} = \frac{\int_0^{r_m} (r+\delta)^2 g(r) dr}{\int_0^{r_m} r^2 g(r) dr};$$

$$\frac{\int_0^{r_m} r^2 g(r) dr + \int_0^{r_m} 2\delta g(r) dr + \int_0^{r_m} \delta^2 g(r) dr}{\int_0^{r_m} r^2 g(r) dr} = \frac{1}{1 - K_{Bo}};$$

$$1 + \frac{2\delta \int_0^{r_m} r g(r) dr + \delta^2}{\int_0^{r_m} r^2 g(r) dr} = \frac{1}{1 - K_{Bo}}.$$

Окончательно имеем:

$$2\delta \frac{\int_0^{r_m} r g(r) dr}{\int_0^{r_m} r^2 g(r) dr} = \frac{K_{Bo}}{1 - K_{Bo}}. \quad (7)$$

В последней формуле пренебрегли δ^2 , поскольку δ на поверхности пор намного меньше их радиуса.

Теперь вычислим интегралы в формуле (7). Они физически имеют смысл среднего радиуса и среднего сечения поровых каналов:

$$\int_0^{r_m} r g(r) dr = (1 - K_{во}) \frac{\alpha}{\alpha+1} r_m;$$

$$\int_0^{r_m} r^2 g(r) dr = (1 - K_{во}) \frac{\alpha}{\alpha+2} r_m^2.$$

Если подставить эти выражения в формулу (7), для максимального радиуса получим следующее выражение:

$$r_m = 2\delta \cdot \frac{\alpha + 2}{\alpha + 1} \cdot \frac{(1 - K_{во})}{K_{во}}.$$

Ранее была получена следующая формула для максимального радиуса:

$$r_m = \frac{\beta}{e^a} \sqrt{\frac{K_{пп}}{K_{п}}}.$$

Приравняем эти выражения:

$$\frac{\beta}{e^a} \sqrt{\frac{K_{пп}}{K_{п}}} = 2\delta \cdot \frac{\alpha + 2}{\alpha + 1} \cdot \frac{(1 - K_{во})}{K_{во}}.$$

Таким образом, для параметра $\sqrt{\frac{K_{пп}}{K_{п}}}$ окончательно получим следующее выражение:

$$\sqrt{\frac{K_{пп}}{K_{п}}} = 2\delta \cdot \frac{\alpha+2}{\alpha+1} \frac{e^a}{\beta} \cdot \frac{(1-K_{во})}{K_{во}}. \quad (8)$$

Результаты и обсуждения

Следует отметить, что для конкретного объекта параметры α, β, a являются константами. Они определяются путем статистической обработки данных капиллярных исследований образцов керн.

Что касается толщины пленки остаточной воды, исследования показывают, что её величина зависит от степени гидрофильности коллектора и в гидрофильных породах практически неизменна.

Выражение (8) перепишем в следующем виде:

$$\sqrt{\frac{K_{пп}}{K_{п}}} = A \cdot \frac{(1-K_{во})}{K_{во}}, \quad (9)$$

где $A = 2\delta \frac{\alpha+2}{\alpha+1} \frac{e^a}{\beta}$.

На рисунке представлены графики сопоставления параметров $\sqrt{\frac{K_{пп}}{K_{п}}}$ и $\frac{(1-K_{во})}{K_{во}}$ для Лас-Еганского и Повховского месторождений Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции.

Анализ показывает, что в обоих случаях имеет место достаточно тесная корреляционная связь между указанными параметрами.

Отсюда следует, что представленные на рис. 1 уравнения регрессии могут быть использованы для оценки абсолютной проницаемости пластов по известным (например, по ГИС) значениям пористости и остаточной водонасыщенности.

Таким образом, получили аналитические выражения для связи между фильтрационным и емкостными параметрами для конкретного продуктивного пласта

на основе данных лабораторных капилляриметрических исследований.

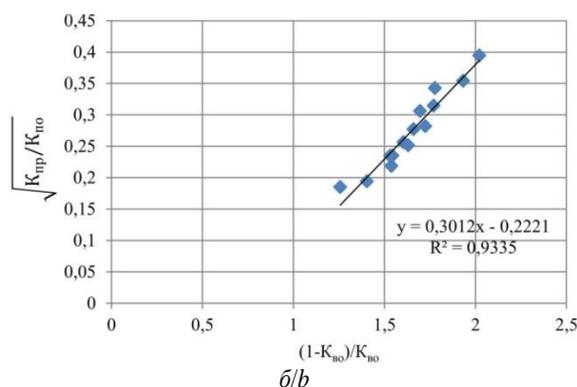
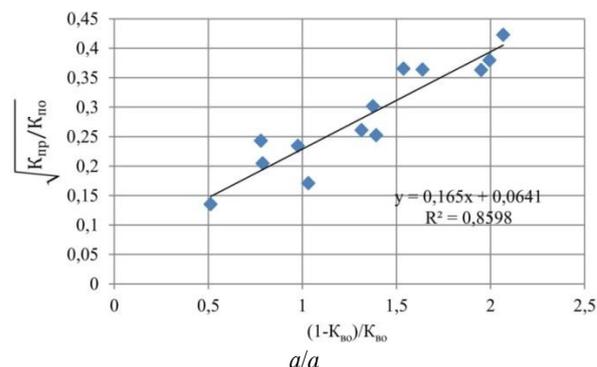


Рисунок. График сопоставления параметров $\sqrt{\frac{K_{пп}}{K_{п}}}$ и $\frac{(1-K_{во})}{K_{во}}$: а) для Лас-Еганского месторождения Западной Сибири; б) для Повховского месторождения Западной Сибири

Figure. Comparison graph of $\sqrt{\frac{K_{пп}}{K_{п}}}$ and $\frac{(1-K_{во})}{K_{во}}$ parameters: а) for Las-Egan field in Western Siberia; б) for Povkhov field in Western Siberia

В соответствии с формулой (9) получим следующее выражения для абсолютной проницаемости:

$$K_{пр} = A^2 \frac{K_{п} (1 - K_{во})^2}{K_{во}^2}. \quad (10)$$

Рассмотрим характер влияния остаточной водонасыщенности на коэффициент проницаемости.

В условиях пород-коллекторов Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции пористость изменяется в интервале от 15 до 25 % (в 1,5–1,7 раз), тогда как остаточная водонасыщенность – от 20 до 60 % (в 3 раза).

При изменении пористости в 1,5–1,7 раза множитель $\frac{(1 - K_{во})^2}{K_{во}^2}$ в формуле (10) изменяется в 15–20 раз, поэтому в условиях коллекторов Западной Сибири наблюдается очень тесная связь между проницаемостью и остаточной водонасыщенностью. При этом можно использовать среднее значение коэффициента пористости.

Выводы

Для условий залежей в терригенных коллекторах Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции:

- получены выражения зависимости начального капиллярного давления и максимального радиуса поровых каналов от фильтрационно-емкостных параметров коллекторов;
- на основе обобщенной математической модели капиллярных кривых получено аналитическое выражение для связей между фильтрационно-емкостными параметрами в условиях конкретного продуктивного пласта;

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Муслимов Р.Х. Особенности разведки и разработки нефтяных месторождений в условиях рыночной экономики. – Казань: ФЭН, 2009. – 727 с.
 2. Оптимизация выработки запасов из водонефтяных зон горизонта D3ps Шкаповского нефтяного месторождения с помощью горизонтальных скважин / Р.Ф. Якупов, В.Ш. Мухаметшин, И.Н. Хахимзянов, В.Е. Трофимов // Георесурсы. – 2019. – Т. 21. – № 3. – С. 55–61. DOI: 10.18599/grs.2019.3.55-61.
 3. Рогачев М.К., Мухаметшин В.В. Контроль и регулирование процесса солянокислотного воздействия на призабойную зону скважин по геолого-промысловым данным // Записки Горного института. – 2018. – Т. 231. – С. 275–280. DOI: 10.25515/PMI.2018.3.275.
 4. Economides M., Oligney R., Valko P. Unified Fracture Design: bridging the gap between theory and practice. – Alvin, Texas: Orsa Press, 2002. – 194 p.
 5. Перспективы применения многофункциональных жидкостей глушения скважин в карбонатных пластах / Ю.В. Зейгман, В.Ш. Мухаметшин, А.Р. Хафизов, С.Б. Харина // SOCAR Proceedings. – 2016. – № 3. – С. 33–39. DOI: 10.5510/OGP20160300286.
 6. Мухаметшин В.В., Андреев В.Е. Повышение эффективности оценки результативности технологий, направленных на расширение использования ресурсной базы месторождений с трудноизвлекаемыми запасами // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2018. – Т. 329. – № 8. – С. 30–36.
 7. Gonzalez I.J.F., Gammiero A., Llamedo M.A. Design of a neural network model for predicting well performance after water shutoff treatments using polymer gels // SPE Latin America and Caribbean Petroleum Engineering Conference. – Mexico City, Mexico, 16–18 April 2012. – 9 p. DOI: 10.2118/153908-MS.
 8. Kuleshova L.S., Mukhametshin V.V., Safiullina A.R. Applying information technologies in identifying the features of deposit identification under conditions of different oil-and gas provinces // Journal of Physics: Conference Series (ITBI 2019 – International Conference «Information Technologies in Business and Industry»). – 2019. – V. 1333. – Iss. 7 (072012). – P. 1–5. DOI: 10.1088/1742-6596/1333/7/072012.
 9. Андреев А.В., Мухаметшин В.Ш., Котенёв Ю.А. Прогнозирование продуктивности залежей в карбонатных коллекторах с трудноизвлекаемыми запасами // SOCAR Proceedings. – 2016. – № 3. – С. 40–45. DOI: 10.5510/OGP20160300287.
 10. Михайлов Н.Н. Петрофизическое обеспечение новых технологий доизвлечения остаточной нефти из техногенно измененных залежей // Каротажник. – 2011. – № 7. – С. 126–137.
 11. Мухаметшин В.В., Кулешова Л.С. О снижении уровня неопределенности при управлении заводнением залежей с трудноизвлекаемыми запасами // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 5. – С. 140–146. DOI: 10.18799/24131830/2020/5/2644.
 12. Yakupov R.F., Mukhametshin V.Sh., Tyncherov K.T. Filtration model of oil coning in a bottom water-drive reservoir // Periodico Tche Quimica. – 2018. – V. 15. – Iss. 30. – P. 725–733.
 13. Новые представления о смачиваемости коллекторов нефти и газа / Н.Н. Михайлов, И.П. Гурбатова, К.А. Моторова, Л.С. Сечина // Нефтяное хозяйство. – 2016. – № 7. – С. 80–85.
 - показано, что в гидрофильных коллекторах наблюдается наиболее тесная связь между фильтрационно-емкостными свойствами продуктивных пластов;
 - выявлена причина наиболее тесной связи коэффициента абсолютной проницаемости от остаточной водонасыщенности;
 - выявленные в работе закономерности могут быть использованы для оценки проницаемости пород-коллекторов по результатам геофизических исследований скважин.
14. Optimization of surfactant-based fluids for acid diversion / H.A. Nasr-El-Din, M.S. Van Domelen, L. Sierra, Th.D. Welton // European Formation Damage Conference. – Scheveningen, The Netherlands, 30 May – 1 June 2007. – 11 p. DOI: 10.2118/107687-MS.
 15. Numerical simulation of oil formation with regulated disturbances. Oil recovery quality simulation / S.A. Batalov, V.E. Andreev, V.M. Lobankov, V.Sh. Mukhametshin // Journal of Physics: Conference Series (ITBI 2019 – International Conference «Information Technologies in Business and Industry»). – 2019. – V. 1333. – Iss. 3 (032006). – P. 1–6. DOI: 10.1088/1742-6596/1333/3/032006.
 16. Михайлов Н.Н., Сечина Л.С., Моторова К.А. Роль глинистых минералов в образовании адсорбционно-связанной нефти в породах-коллекторах углеводородного сырья // Георесурсы, геознергетика, геополитика. – 2012. – № 1 (5). – С. 51.
 17. Auxiliary equipment for downhole fittings of injection wells and water supply lines used to improve their performance in winter / L.S. Kuleshova, R.R. Kadyrov, V.V. Mukhametshin, R.T. Akhmetov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (MEACS 2018 – International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems). – 2019. – V. 560. – Iss. 1 (012071). – P. 1–6. DOI: 10.1088/1757-899X/560/1/012071.
 18. Numerical simulation of the oil reservoir with regulated disturbances. Oil recovery stability simulation / S.A. Batalov, V.E. Andreev, V.M. Lobankov, V.Sh. Mukhametshin // Journal of Physics: Conference Series (ITBI 2019 – International Conference «Information Technologies in Business and Industry»). – 2019. – V. 1333. – Iss. 3 (032007). – P. 1–6. DOI: 10.1088/1742-6596/1333/3/032007.
 19. McLachlan G.J. Discriminant analysis and statistical pattern recognition. – Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2004. – 545 p.
 20. Alimkhanov R., Samoylova I. Application of data mining tools for analysis and prediction of hydraulic fracturing efficiency for the BV8 reservoir of the Povkh oil field // SPE Russian oil and gas exploration & Production technical conference and exhibition. – Moscow, Russia, 14–16 October 2014. – 20 p. DOI: 10.2118/171332-RU.
 21. Mahinpey N., Ambalae A., Asghari K. In situ combustion in Enhanced Oil Recovery (EOR): a review // Chemical Engineering Communications. – V. 194. – Iss. 8. – P. 995–1021.
 22. Рогачев М.К., Мухаметшин В.В., Кулешова Л.С. Повышение эффективности использования ресурсной базы жидких углеводородов в юрских отложениях Западной Сибири // Записки Горного института. – 2019. – Т. 240. – С. 711–715. DOI: 10.31897/PMI.2019.6.711.
 23. Use of hydrochloric acid to remove filter-cake damage from preformed particle gel during conformance-control treatments / A. Imqam, B. Bai, M. Wei, H. Elue, F.A. Muhammed // SPE Production & Operations. – 2016. – V. 31. – № 3. – 11 p. DOI: 10.2118/172352-PA.
 24. Mukhametshin V.Sh. Justification for increasing the performance of hydrochloric acid treatment in wells of fields with carbonate reservoir // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (ISEES 2020 – 3rd International Symposium on Engineering and Earth Sciences). – 2020. – V. 905. – Iss. 1. – P. 1–5. DOI: 10.1088/1757-899X/905/1/012083.

25. Huh C., Pope G.A. Residual oil saturation from polymer floods: laboratory measurements and theoretical interpretation // SPE Symposium on Improved Oil Recovery. – Tulsa, Oklahoma, USA, 20–23 April 2008. – 21 p. DOI: 10.2118/113417-MS.
26. Identification and evaluation of high-performance EOR surfactants / D. Levitt, A. Jackson, C. Heinson, L.N. Britton, T. Malik, V. Dwarakanath, G.A. Pope // SPE Reservoir Evaluation & Engineering. – 2009. – V. 12. – Iss. 2. – P. 243–253. DOI: 10.2118/100089-PA.
27. Zakaria A.S., Nasr-El-Din H.A. A novel polymer-assisted emulsified-acid system improves the efficiency of carbonate matrix acidizing // SPE Journal. – 2016. – V. 21. – № 3. – 14 p. DOI: 10.2118/173711-PA.
28. Byrnes A.P., Bhattacharya S. Influence of initial and residual oil saturation and relative permeability on recovery from transition zone reservoirs in shallow-shelf carbonates // SPE/DOE Symposium on Improved Oil Recovery. – Tulsa, Oklahoma, USA, 22–26 April 2006. – 11 p. DOI: 10.2118/99736-MS.
29. Solar Thermal Electricity Global Outlook 2016. URL: http://www.solarpaces.org/new-web-nasertic/images/pdfs/GP-ESTELA-SolarPACES_Solar-Thermal-Electricity-Global-Outlook-2016_Executive-Summary.pdf (дата обращения: 19.01.2020).
30. Mukhametshin V.Sh. Rationale for the production of hard-to-recover deposits in carbonate reservoirs // IOP: Earth and Environmental Science (EES) (International Symposium «Earth sciences: history, contemporary issues and prospects»). – 2020. – V. 579. – Iss. 1. – P. 1–5. DOI: 10.1088/1755-1315/579/1/012012.

Поступила 23.06.2021 г.

Информация об авторах

Мухаметшин В.В., доктор технических наук, профессор кафедры разведки и разработки нефтяных и газовых месторождений, Уфимский государственный нефтяной технический университет.

Ахметов Р.Т., кандидат технических наук, профессор кафедры разведки и разработки нефтяных и газовых месторождений, филиал Уфимского государственного нефтяного технического университета в г. Октябрьском.

Кулешова Л.С., старший преподаватель кафедры разведки и разработки нефтяных и газовых месторождений, заместитель директора по УР, филиал Уфимского государственного нефтяного технического университета в г. Октябрьском.

Грезина О.А., доцент, старший преподаватель, заместитель заведующего кафедрой разведки и разработки нефтяных и газовых месторождений, филиал Уфимского государственного нефтяного технического университета в г. Октябрьском.

UDC 622.276.63

ANALYTICAL LINKS BETWEEN POROSITY AND PERMEABILITY CORRELATIONS OF PRODUCTIVE STRATA OF WESTERN SIBERIA BASED ON A GENERALIZED MATHEMATICAL MODEL OF CAPILLARY CURVES

Vyacheslav V. Mukhametshin¹,
vv@of.ugntu.ru

Rasul T. Akhmetov²,
info@of.ugntu.ru

Lyubov S. Kuleshova²,
markl212@mail.ru

Olga A. Grezina²,
ugntu.grezina@mail.ru

¹ Ufa State Petroleum Technological University,
1, Kosmonavtov street, Ufa, 450064, Russia.

² Ufa State Petroleum Technological University, Branch of the University in the City of Oktyabrsky,
54a, Devonskaya street, Oktyabrsky, 452607, Russia.

Relevance. Analytical relationships between the reservoir properties of Western Siberia deposits make it possible to estimate permeability and potential well production rates. Obtaining such multidimensional relationships at the initial stage of development is an important and urgent task. Multidimensional relations between reservoir parameters, proposed by different researchers, require selection and adaptation to a specific object. However, the analytical relationships proposed in this work are obtained basing on the analysis of the capillary pressure curves behavior of a reservoir. In this case, the relation automatically adapts to a specific object and is optimal in structure and character.

The aim of the research is to obtain analytical expressions for multivariate associations between the filtration and capacity properties of reservoir rocks based on the analysis and generalization of core sample studies resulting from the capillarimetric studies. The obtained dependencies should provide an estimate with sufficient for practical purposes accuracy of the absolute permeability of the formation and the potential flow rate of the well based on the known residual water saturation and porosity of the formation values according to the production geophysics data.

Facilities: productive strata of the Triassic, Jurassic and Lower Cretaceous ages of the Las-Egan and Povkhov oil fields.

Methods: statistical processing of the core samples data from a number of productive formations basing on their capillarimetric studies.

Results. On the basis of a comprehensive analysis of the generalized mathematical model of capillary curves, a technique has been developed for obtaining analytical expressions for multidimensional relationships between porosity and permeability correlations of Western Siberia reservoirs. The paper presents analytical expressions, as well as graphs of relationships between the porosity and permeability correlations for the Las-Egan and Povkhov fields, which make it possible to estimate the absolute permeability of productive formations from the known porosity and residual water saturation values. The proposed method allows obtaining multidimensional relationships for any productive formation in the conditions of Western Siberia; it is shown in the work that in hydrophilic reservoirs there is the closest relationship between the porosity and permeability properties; the reason for the close relationship between the absolute permeability of productive formations in Western Siberia and the residual water saturation of the reservoir has been identified.

Key words:

Capillarimetry, permeability, porosity, residual water saturation, structure and nature of the bond.

REFERENCES

- Muslimov R.Kh. *Osobennosti razvedki i razrabotki neftyanykh mestorozhdeniy v usloviyakh rynochnoy ekonomiki* [Features of the exploration and development of oil fields in a market economy]. Kazan, FEN Publ., 2009. 727 p.
- Yakupov R.F., Mukhametshin V.Sh., Khakimzyanov I.N., Trofimov V.E. Optimization of reserve production from water oil zones of D3ps horizon of Shkapovsky oil field by means of horizontal wells. *Georesursy*, 2019, vol. 21, no. 3, pp. 55–61. In Rus. DOI: 10.18599/grs.2019.3.55-61.
- Rogachev M.K., Mukhametshin V.V. Control and regulation of the hydrochloric acid treatment of the bottomhole zone based on field-geological data. *Journal of Mining Institute*, 2018, vol. 231, pp. 275–280. In Rus. DOI: 10.25515/PMI.2018.3.275.
- Economides M., Oligney R., Valko P. *Unified fracture design: bridging the gap between theory and practice*. Alvin, Texas, Orsa Press, 2002. 194 p.
- Zeigman Yu.V., Mukhametshin V.Sh., Khafizov A.R., Kharina S.B. Prospects of application of multi-functional well killing fluids in carbonate reservoirs. *SOCAR Proceedings*, 2016, no. 3, pp. 33–39. In Rus. DOI: 10.5510/OGP20160300286.
- Mukhametshin V.V., Andreev V.E. Increasing the efficiency of assessing the performance of techniques aimed at expanding the use of resource potential of oilfields with hard-to-recover reserves. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 8, pp. 30–36. In Rus.
- Gonzalez I.J.F., Gammiero A., Llamedo M.A. Design of a neural network model for predicting well performance after water shutoff treatments using polymer gels. *SPE Latin America and Caribbean Petroleum Engineering Conference*. Mexico City, Mexico, April 16–18, 2012. 9 p. DOI: 10.2118/153908-MS.
- Kuleshova L.S., Mukhametshin V.V., Safiullina A.R. Applying information technologies in identifying the features of deposit identification under conditions of different oil-and gas provinces. *Journal of Physics: Conference Series (ITBI 2019 – International Conference «Information Technologies in Business and Industry»)*, 2019, vol. 1333, Iss. 7 (072012), pp. 1–5. DOI: 10.1088/1742-6596/1333/7/072012.

9. Andreev A.V., Mukhametshin V.Sh., Kotenev Yu.A. Deposit Productivity Forecast in Carbonate Reservoirs with Hard to Recover Reserves. *SOCAR Proceedings*, 2016, no. 3, pp. 40–45. In Rus. DOI: 10.5510/OGP20160300287.
10. Mikhailov N.N. Petrophysical support for novel technologies for the re-extraction of residual oil from man-modified pools. *Karotazhnik*, 2011, no. 7, pp. 126–137. In Rus.
11. Mukhametshin V.V., Kuleshova L.S. On uncertainty level reduction in managing waterflooding of the deposits with hard to extract reserves. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 5, pp. 140–146. In Rus. DOI: 10.18799/24131830/2020/5/2644.
12. Yakupov R.F., Mukhametshin V.Sh., Tyncherov K.T. Filtration model of oil coning in a bottom water-drive reservoir. *Periodico Tche Quimica*, 2018, vol. 15, Iss. 30, pp. 725–733.
13. Mikhailov N.N., Gurbatova I.P., Motorova K.A., Sechina L.S. New representations of wettability of oil and gas reservoirs. *Neftyanoe khozyaystvo = Oil Industry*, 2016, no. 7, pp. 80–85. In Rus.
14. Nasr-El-Din H.A., Van Domelen M.S., Sierra L., Welton Th.D. Optimization of surfactant-based fluids for acid diversion. *European Formation Damage Conference*. Scheveningen, The Netherlands, 30 May – 1 June, 2007. 11 p. DOI: 10.2118/107687-MS.
15. Batalov S.A., Andreev V.E., Lobankov V.M., Mukhametshin V.Sh. Numerical simulation of oil formation with regulated disturbances. Oil recovery quality simulation. *Journal of Physics: Conference Series (ITBI 2019 – International Conference «Information Technologies in Business and Industry»)*, 2019, vol. 1333, Iss. 3 (032006), pp. 1–6. DOI: 10.1088/1742-6596/1333/3/032006.
16. Mikhailov N.N., Sechina L.S., Motorova K.A. Role of clay minerals in formation of the adsorption-connected oil in rock-collectors of hydrocarbonic raw materials. *Georesources, geoenergetics, geopolitics*, 2012, no. 1 (5), pp. 51. In Rus.
17. Kuleshova L.S., Kadyrov R.R., Mukhametshin V.V., Akhmetov R.T. Auxiliary equipment for downhole fittings of injection wells and water supply lines used to improve their performance in winter. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (MEACS 2018 – International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems)*, 2019, vol. 560, Iss. 1 (012071), pp. 1–6. DOI: 10.1088/1757-899X/560/1/012071.
18. Batalov S.A., Andreev V.E., Lobankov V.M., Mukhametshin V.Sh. Numerical simulation of the oil reservoir with regulated disturbances. *Oil recovery stability simulation. Journal of Physics: Conference Series (ITBI 2019 – International Conference «Information Technologies in Business and Industry»)*, 2019, vol. 1333, Iss. 3 (032007), pp. 1–6. DOI: 10.1088/1742-6596/1333/3/032007.
19. McLachlan G.J. *Discriminant analysis and statistical pattern recognition*. Hoboken, New Jersey, John Wiley & Sons, 2004. 545 p.
20. Alimkhanov R., Samoylova I. Application of data mining tools for analysis and prediction of hydraulic fracturing efficiency for the BV₈ reservoir of the Povkh oil field. *SPE Russian oil and gas exploration & Production technical conference and exhibition*. Moscow, Russia, October 14–16, 2014. 20 p. DOI: 10.2118/171332-RU.
21. Mahinpey N., Ambalae A., Asghari K. In situ combustion in Enhanced Oil Recovery (EOR): A Review. *Chemical Engineering Communications*, vol. 194, Iss. 8, pp. 995–1021.
22. Rogachev M.K., Mukhametshin V.V., Kuleshova L.S. Improving the efficiency of using resource base of liquid hydrocarbons in Jurassic deposits of Western Siberia. *Journal of Mining Institute*, 2019, vol. 240, pp. 711–715. In Rus. DOI: 10.31897/PMI.2019.6.711.
23. Imqam A., Bai B., Wei M., Elue H., Muhammed F.A. Use of hydrochloric acid to remove filter-cake damage from preformed particle gel during conformance-control treatments. *SPE Production & Operations*, 2016, vol. 31, no. 3, 11 p. DOI: 10.2118/172352-PA.
24. Mukhametshin V.Sh. Justification for increasing the performance of hydrochloric acid treatment in wells of fields with carbonate reservoir. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (ISEES 2020 – 3rd International Symposium on Engineering and Earth Sciences)*, 2020, vol. 905, Iss. 1, pp. 1–5. DOI: 10.1088/1757-899X/905/1/012083.
25. Huh C., Pope G.A. Residual oil saturation from polymer floods: laboratory measurements and theoretical interpretation. *SPE Symposium on Improved Oil Recovery*. Tulsa, Oklahoma, USA, April 20–23, 2008. 21 p. DOI: 10.2118/113417-MS.
26. Levitt D., Jackson A., Heinson C., Britton L.N., Malik T., Dwarkanath V., Pope G.A. Identification and evaluation of high-performance EOR surfactants. *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*, 2009, vol. 12, Iss. 2, pp. 243–253. DOI: 10.2118/100089-PA.
27. Zakaria A.S., Nasr-El-Din H.A. A novel polymer-assisted emulsified-acid system improves the efficiency of carbonate matrix acidizing. *SPE Journal*, 2016, vol. 21, no. 3, 14 p. DOI: 10.2118/173711-PA.
28. Byrnes A.P., Bhattacharya S. Influence of initial and residual oil saturation and relative permeability on recovery from transition zone reservoirs in shallow-shelf carbonates. *SPE/DOE Symposium on Improved Oil Recovery*. Tulsa, Oklahoma, USA, April 22–26, 2006, 11 p. DOI: 10.2118/99736-MS.
29. *Solar Thermal Electricity Global Outlook 2016*. Available at: http://www.solarpaces.org/new-web-nasertic/images/pdfs/GP-ESTELA-SolarPACES_Solar-Thermal-Electricity-Global-Outlook-2016_Executive-Summary.pdf (accessed 19 January 2020).
30. Mukhametshin V.Sh. Rationale for the production of hard-to-recover deposits in carbonate reservoirs. *IOP: Earth and Environmental Science (EES) (International Symposium «Earth sciences: history, contemporary issues and prospects»)*, 2020, vol. 579, Iss. 1, pp. 1–5. DOI: 10.1088/1755-1315/579/1/012012.

Received: 23 June 2021.

Information about the authors

Vyacheslav V. Mukhametshin, Dr. Sc., professor, Ufa State Petroleum Technological University.

Rasul T. Akhmetov, Cand. Sc., professor, Ufa State Petroleum Technological University, Branch of the University in the City of Oktyabrsky.

Lyubov S. Kuleshova, senior lecturer, deputy director for Academic Affairs, Ufa State Petroleum Technological University, Branch of the University in the City of Oktyabrsky.

Olga A. Grezina, associate professor, senior lecturer, deputy head of the Department of Oil and Gas Field Exploration and Development, Ufa State Petroleum Technological University, Branch of the University in the City of Oktyabrsky.

УДК 622.276.53-83.001.24

НОВАЯ МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПРЕОБРАЗУЮЩЕГО МЕХАНИЗМА СТАНКОВ-КАЧАЛОК

Хабибуллин Марат Яхиевич¹,
m-hab@mail.ru

Уфимский государственный нефтяной технический университет, филиал в г. Октябрьский,
Россия, 452607, г. Октябрьский, ул. Девонская, 54а.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью обеспечить более эффективную работу кинематической схемы станка-качалки. Решение этой проблемы позволит улучшить работу кинематической схемы с точки зрения возникающих в нем нагрузок и снизить металлоемкость наземного привода скважинного штангового насоса при его проектировании.

Цель: разработать и предложить методику проектирования станка-качалки при его производстве и изготовлении.

Объекты. Преобразующий механизм станков-качалок представляет собой шарнирный четырёхзвенный механизм, выполненный по симметричной и несимметричной кинематическим схемам. При симметричной схеме центр вращения кривошипа находится на прямой, проходящей через точки, соответствующие крайним положениям сочленения шатуна и балансира. Все остальные случаи соответствуют несимметричной схеме. В настоящее время, в соответствии с имеющейся методикой проектирования преобразующего механизма симметричной схемы, в качестве исходных данных используют кинематические соотношения $\frac{r}{K}$ и $\frac{r}{l}$ – отношения радиуса кривошипа к длине соответственно заднего плеча балансира и шатуна. Объектом исследования является шарнирный механизм, преобразующий вращательное движение электродвигателя в возвратно-поступательное движение точки подвеса штанг.

Методы. Более предпочтительной и практичной считается методика, позволяющая проектировать механизм по заранее заданным выходным параметрам. При этом рекомендуется использовать параметры, непосредственно определяющие как тип кинематической схемы преобразующего механизма, так и его габаритные размеры. Следует отметить, что не все теоретически реальные механизмы могут быть практически осуществимы. Поэтому реальная область углов ψ несколько уже теоретически реальной области и должна определяться с учётом конструктивных особенностей механизма (например, в крайнем близком к корпусу положении траверсы не должна задевать корпус редуктора, высота механизма должна быть такой, чтобы в нижнем положении подвеска устьевого штока не задевала устьевой сальник, и др.). Для удобства пользования предлагаемой методикой целесообразно искомые величины представить в приведённом виде (в долях длины хода).

Результаты. По полученным формулам с использованием данных каталогов разных фирм вычислены приведённые значения кинематических параметров преобразующих механизмов различных кинематических схем. В результате получаем, что габаритные размеры преобразующего механизма отечественных станков-качалок симметричной схемы (длина на 45...60 %, а высота – 25...30 %) меньше, чем у зарубежных станков-качалок несимметричной схемы. Разработанная методика позволяет сопоставить технико-эксплуатационные показатели станков-качалок, выполненных по различным кинематическим схемам. Предлагаемая методика при оптимальной функции положения, при которой динамические нагрузки на привод минимальны, эффективность работы скважинного штангового насоса максимальна, таким образом позволяет снизить металлоемкость станка-качалки при его проектировании.

Ключевые слова:

Четырёхзвенный механизм, симметричная, несимметричная, кинематическая, схема, угол, размах.

Введение

Преобразующий механизм станков-качалок представляет собой шарнирный четырёхзвенный механизм, выполненный по симметричной и несимметричной кинематическим схемам [1–3]. При симметричной схеме центр вращения кривошипа находится на прямой, проходящей через точки, соответствующие крайним положениям сочленения шатуна и балансира. Все остальные случаи соответствуют несимметричной схеме.

В настоящее время, в соответствии с имеющейся методикой проектирования преобразующего механизма симметричной схемы, в качестве исходных данных используют кинематические соотношения $\frac{r}{K}$ и $\frac{r}{l}$ – отношения радиуса кривошипа к длине соответственно заднего плеча балансира и шатуна [4–6]. При проектировании механизма несимметричной схемы, кроме перечисленных выше параметров, за-

дают еще угол дезаксиала – угол, образуемый положениями шатуна, соответствующими началу и концу ходов вверх головки балансира.

Более предпочтительной и практичной считается методика, позволяющая проектировать механизм по заранее заданным выходным параметрам. При этом рекомендуется использовать параметры, непосредственно определяющие как тип кинематической схемы преобразующего механизма, так и его габаритные размеры: угол размаха балансира δ_0 и угол дезаксиала θ [7–10]. На рис. 1 представлен преобразующий механизм станка-качалки. Через точки B_1 и B_2 проведена окружность с центром в точке O_1 произвольным радиусом R . Любая точка этой окружности может рассматриваться как точка вращения кривошипа станка-качалки. Соединяя точку C прямыми с точками B_1 и B_2 , получаем $B_1C=l+r$ и $B_2C=l-r$, а угол между этими прямыми ($\angle B_1CB_2=\theta$) является углом дезаксиала станка-качалки.

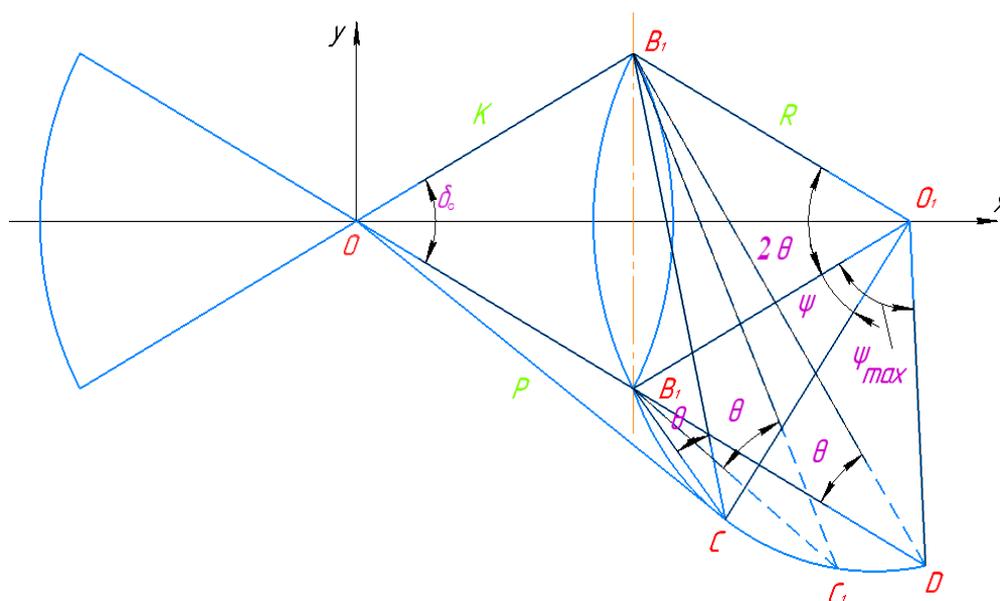


Рис. 1. Расчётная схема преобразующего механизма станка-качалки
Fig. 1. Design diagram of the pumping unit conversion mechanism

Таким образом, соединяя любую точку окружности радиусом R с точками B_1 и B_2 , можно получить преобразующий механизм, имеющий одинаковую степень неравномерности хода и угол размаха балансира, но различные абсолютные длины шатуна и кривошипа и габаритные размеры. Действительно, как видно из рис. 1,

$$\left(\angle B_1 C B_2 = \angle B_1 D B_2 = \frac{1}{2} \angle B_1 B_2 = \theta \right). \quad (1)$$

Следовательно, центр вращения кривошипа станков-качалок, имеющих одинаковые степень неравномерности хода (т. е. угол θ) и угол δ_0 , перемещается по окружности, проходящей через точки B_1 и B_2 , соответствующие крайним положениям соединения шатуна с балансиром.

Назовем эту окружность окружностью равных дезаксиалов. Центр этой окружности находится на биссектрисе угла размаха балансира: для станков-качалок с положительным дезаксиалом – с противоположной стороны по отношению линии $B_1 B_2$ от опоры балансира, для станков с отрицательным дезаксиалом – со стороны опоры балансира.

Параметры окружности равных дезаксиалов также определяются принятыми исходными данными [11–14]. Поскольку угол $\angle B_1 O_1 B_2$ является центральным углом этой окружности, с учетом равенства (1) имеем

$$\angle B_1 O_1 B_2 = 2\theta. \quad (2)$$

Радиус окружности равных дезаксиалов можно найти из треугольников $O B_1 B_2$ и $O_1 B_1 B_2$ по следующей формуле с учетом обозначения (2):

$$R = K \frac{\sin \frac{\delta_0}{2}}{\sin \theta}; \quad (3)$$

тогда координаты центра окружности

$$\left. \begin{aligned} x_0 &= K \cos \frac{\delta_0}{2} + R \cos \theta = K \frac{\sin(\theta + \frac{\delta_0}{2})}{\sin \theta}; \\ \phi_0 &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Координаты центра вращения кривошипов станков-качалок с одинаковым углом дезаксиала можно выразить в параметрической форме, учитывая (4):

$$\left. \begin{aligned} x_c &= x_0 - R \cos(\theta + \psi); \\ y_c &= R \sin(\theta + \psi) \end{aligned} \right\}, \quad (5)$$

где ψ – угол между подвижным радиусом R (в направлении против часовой стрелки) и его исходным положением $O_1 B_1$.

Расстояние между центром вращения кривошипа и опорой балансира по горизонтали назовем длиной, а по вертикали – высотой преобразующего механизма. При этом, как видно из рис. 1, абсцисса и ордината центра вращения (5) представляют собой соответственно длину и высоту механизма. Из равнобедренных треугольников $B_1 O_1 C$ и $B_2 O_1 C$ получим

$$\left. \begin{aligned} l &= 2R \cos \frac{\theta}{2} \sin \frac{\theta + \psi}{2}; \\ r &= 2R \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta + \psi}{2}. \end{aligned} \right\}. \quad (6)$$

Из уравнений (3) и (6) получим выражения для определения кинематических соотношений:

$$\left. \begin{aligned} \frac{r}{K} &= \frac{\sin \frac{\delta_0}{2} \cos \frac{\theta + \psi}{2}}{\cos \frac{\theta}{2}}; \\ \frac{r}{l} &= \frac{\operatorname{tg} \frac{\theta}{2}}{\operatorname{tg} \frac{\theta + \psi}{2}}; \\ \frac{r}{P} &= \frac{\frac{r}{K}}{\frac{P}{K}}. \end{aligned} \right\}. \quad (7)$$

Полусное расстояние (расстояние от центра вращения кривошипа до опоры балансира) можно определить из треугольника $O O_1 C$:

$$\frac{P}{K} = \frac{\sin(\theta + \frac{\delta_0}{2})}{\sin \theta} \sqrt{1 + \frac{\sin^2 \frac{\delta_0}{2}}{\sin^2(\theta + \frac{\delta_0}{2})} - 2 \sin \frac{\delta_0}{2} \frac{\cos(\theta + \psi)}{\sin(\theta + \frac{\delta_0}{2})}. \quad (8)$$

Зная значения кинематических соотношений (7), по известным формулам [1] можно вычислить все необходимые углы между звеньями преобразующего механизма, а также перемещение, скорость движения и ускорение точки подвеса штанг станка-качалки.

Как видно из выражений (6)–(8), длины звеньев и их соотношения зависят не только от исходных данных, но и от параметра ψ . Для получения реальных механизмов нужно определить граничные значения параметра ψ в зависимости от принятых исходных данных.

Граничное значение параметра ψ легко находится из условия существования механизма [15] определяем по формуле:

$$\left. \begin{aligned} P < K + (l - r); \\ \frac{P}{K} < 1 + \frac{1 - \frac{r}{l}}{\frac{r}{K}} \cdot r. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

С учётом систем уравнений (7) и (9) имеем

$$\frac{P}{K} < 1 + \frac{2 \sin \frac{\delta_0}{2} \sin \frac{\psi}{2}}{\sin \theta}. \quad (10)$$

Тогда из соотношений (8) и (10) получим условие существования механизма в виде неравенства по формуле:

$$1 + \frac{\sin \frac{\delta_0}{2} \sin \frac{\psi}{2}}{\sin \theta} > \frac{\sin(\theta + \frac{\delta_0}{2})}{\sin \theta} \sqrt{1 + \frac{\sin^2 \frac{\delta_0}{2}}{\sin^2(\theta + \frac{\delta_0}{2})} - 2 \frac{\sin \frac{\delta_0}{2} \cos(\theta + \psi)}{\sin(\theta + \frac{\delta_0}{2})}} \quad (11)$$

Решение уравнения (11) позволяет определить область углов ψ , обусловленную условием поворачиваемости (существования) механизма, в следующем виде:

$$0 < \psi < 180^\circ - (2\theta + \delta_0). \quad (12)$$

Решение уравнения (12) может быть получено из треугольника O_1DB_2 (рис. 1), так как $\angle O_1B_2D = \angle O_1DB_2 = \theta + \delta/2$. Следовательно, центр вращения кривошипа теоретически реальных механизмов находится на дуге $\overset{\frown}{B_2CO}$ окружности равных дезаксиалов.

Следует отметить, что не все теоретически реальные механизмы могут быть практически осуществимы [16–19]. Поэтому реальная область углов ψ несколько уже теоретически реальной области (3) и должна определяться с учётом конструктивных особенностей механизма (например, в крайне близком к корпусу положении траверсы не должна задевать корпус редуктора, высота механизма должна быть такой, чтобы в нижнем положении подвеска устьевого штока не задевала устьевой сальник, и др.) [20–22].

С учётом этого можно рекомендовать следующую область углов ψ , полученную из соотношений (8), согласно формуле:

$$\arctg \left[\frac{\text{tg} \frac{\theta}{2}}{\left(\frac{r}{l}\right)_{\max}} \right] < \frac{\psi + \theta}{2} < \arctg \left[\frac{\text{tg} \frac{\theta}{2}}{\left(\frac{r}{l}\right)_{\min}} \right]. \quad (13)$$

Предельные значения ψ обусловлены максимальным и минимальным значениями кинематического соотношения r/l . С учётом конструктивных особенно-

стей кинематических и динамических характеристик, а также исходя из многолетнего опыта проектирования и эксплуатации станков-качалок и формулы (13), рекомендуется использовать следующие соотношения:

$$\left(\frac{r}{l}\right)_{\max} \text{ и } \left(\frac{r}{l}\right)_{\min}. \quad (14)$$

Таким образом, реальная область значений параметра с учетом соотношений (14) определяется при принятых конструктивных ограничениях только углом дезаксиала по следующему неравенству:

$$\arctg \left(2,5 \text{tg} \frac{\theta}{2} \right) < \frac{\theta + \psi}{2} < \arctg \left(5 \text{tg} \frac{\theta}{2} \right). \quad (15)$$

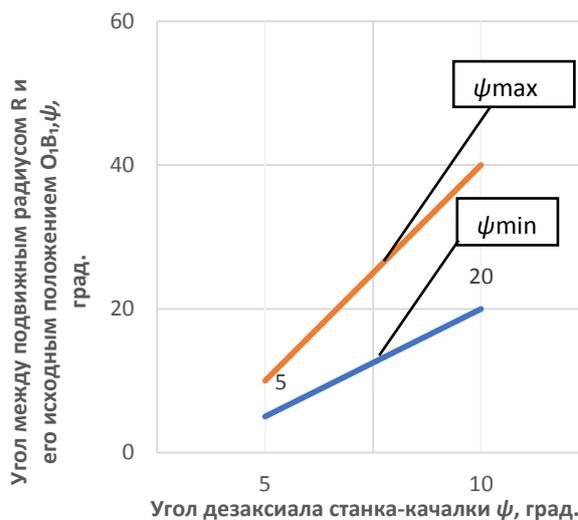


Рис. 2. Зависимость угла ψ от угла дезаксиала θ станка-качалки

Fig. 2. Dependence of the angle ψ on the disaxial angle θ of the pumping unit

Анализ показывает, что граничные линии области углов (рис. 2) могут быть аппроксимированы простой и удобной линейной зависимостью согласно неравенству по формуле:

$$1,5 < \frac{\psi}{\theta} < 3,75, \quad (16)$$

из которой вытекает соотношение $\psi_{\max} = 2,5 \psi_{\min}$.

Задаваясь различными значениями ψ в указанных пределах (15) и (16), по формулам (7), (8) можно вычислить соответствующие значения кинематических параметров преобразующего механизма станков-качалок, имеющих одинаковые углы балансира и степень неравномерности хода, но отличающихся длиной звеньев, габаритными размерами и массой, и затем, сравнивая кинематические и динамические характеристики, выбрать наиболее компактный механизм.

Для удобства пользования предлагаемой методикой целесообразно искомые величины представить в приведённом виде (в долях длины хода) [23–25]. Тогда заднее плечо балансира K , радиус кривошипа r_0 , длину шатуна l_0 , полюсное расстояние P_0 , длину L_0 и высоту H_0 преобразующего механизма можно определить по следующим формулам:

$$\left. \begin{aligned} K &= \frac{1}{\delta_0}; \\ r_0 &= \frac{\sin \frac{\delta_0}{2} \cos \frac{\theta+\psi}{2}}{\delta_0 \cos \frac{\theta}{2}}; \\ l_0 &= \frac{\sin \frac{\delta_0}{2} \sin \frac{\theta+\psi}{2}}{\delta_0 \sin \frac{\theta}{2}}; \\ P_0 &= \frac{\sin(\theta + \frac{\delta_0}{2})}{\delta_0 \sin \theta} \sqrt{1 + \frac{\sin^2 \frac{\delta_0}{2}}{\sin^2(\theta + \frac{\delta_0}{2})} - 2 \frac{\sin \frac{\delta_0}{2} \cos(\theta + \psi)}{\sin(\theta + \frac{\delta_0}{2})}}; \\ L_0 &= \frac{\sin(\theta + \frac{\delta_0}{2}) - \sin \frac{\delta_0}{2} \cos(\theta + \psi)}{\delta_0 \sin \theta}; \\ H_0 &= \frac{\sin \frac{\delta_0}{2} \sin(\theta + \psi)}{\delta_0 \sin \theta}. \end{aligned} \right\} (17)$$

Для получения абсолютной длины звеньев для любой длины хода станка-качалки данные, полученные по формулам (17), следует умножить на $\frac{S_0}{K_1/K}$ (здесь S_0 – длина хода точки подвеса штанг, м; K_1 – переднее плечо балансира).

По полученным формулам с использованием данных каталогов разных фирм вычислены приведённые значения кинематических параметров преобразую-

Заключение

Как видно, габаритные размеры преобразующего механизма отечественных станков-качалок симметричной схемы (длина на 45...60 %, а высота на 25...30 %) меньше, чем у зарубежных станков-качалок несимметричной схемы. Разработанная методика с учётом формул (17) позволяет сопоставить технико-эксплуатационные показатели станков-

щих механизмов различных кинематических схем (таблица).

Таблица. Кинематические параметры различных кинематических схем преобразующих механизмов станков-качалок

Table. Kinematic parameters of various kinematic schemes of converting mechanisms of pumping units

| Кинематические показатели Kinematic indicators | Симметричная схема Symmetrical circuit | Несимметричная схема* Unbalanced circuit* |
|---|---|--|
| $\delta_{гр}$ | 57,3 | 45/50 |
| $\theta_{гр}$ | 0,00 | 2,5/11 |
| $\psi_{гр}$ | 0,00 | 5,46/23,56 |
| r/K | 0,4794 | 0,38/0,405 |
| r/l | 0,4 | 0,31/0,31 |
| K | 1,0 | 1,273/1,146 |
| r_0 | 0,4794 | 0,486/0,486 |
| L_0 | 1,1985 | 1,55/1,50 |
| H_0 | 1,1985 | 1,546/1,44 |
| L_0 | 0,8776 | 1,273/1,44 |

Примечание: * В числителе – данные фирмы Люфкин, в знаменателе – фирмы Бетлехем (США).

Note: * The numerator is the data of the Lufkin company, the denominator is the data of the Bethlehem company (USA).

качалок, выполненных по различным кинематическим схемам. Предлагаемая методика при оптимальной функции положения [26], при которой динамические нагрузки на привод минимальны [27, 28], эффективность работы скважинного штангового насоса максимальна, позволяет снизить металлоемкость станка-качалки при его проектировании.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Караев И.К. Методика проектирования преобразующего механизма станков-качалок // Химическое и нефтяное машиностроение. – 1986. – № 6. – С. 3–6.
2. Коннов Ю.Д., Сидоркин Д.И., Хабибуллин М.Я. Механизация технологического процесса спуско-подъемных операций при текущем и капитальном ремонте скважин // SOCAR Proceedings. – 2018. – № 2. – С. 15–24. DOI: 10.5510/OGP20180200346.
3. Cheng, Q., Yuan L. Vector control of an induction motor based on a DSP. Master of Science Thesis. – Sweden, Gothenburg, 2011. – 76 p.
4. Sensorless direct torque and stator flux control of induction machines using an extended Kalman filter / V. Comnac, M. Cernat, M. Cotorogea, I. Draghici // IEEE Int. Conf. on Control Appl. – Mexico City, Mexico, 2001. – P. 674–679.
5. Архипов К.И., Попов В.И., Попов И.В. Справочник по станкам-качалкам. – Альметьевск: Татнефть, 2000. – 146 с.
6. Khabibullin M.Ya. Managing the reliability of the tubing string in impulse non-stationary flooding // Journal of Physics: Conference Series. International Conference «Information Technologies in Business and Industry». Mechatronics, Robotics and Electrical Drives, Novosibirsk. – 2019. – P. 052012. DOI: 10.1088/1742-6596/1333/5/052012.
7. Gibbs S.G. Rod pumping. Modern methods of design, diagnosis and surveillance. – USA, Ashland, OH: BookMasters Inc., 2012. – 682 p.
8. Обоснование условий расчета и выбора прочностных характеристик эксплуатационных колонн сладковско-морозовской группы месторождений / В.Ю. Близнюков, А.Г. Гиляев, Г.Г. Гиляев, Р.Т. Еганьянц // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2010. – № 2. – С. 31–38.

9. Молчанов А.Г. Станки-качалки: проблемы и перспективы совершенствования // Промышленные ведомости. – 2007. – № 10. – С. 45–60.
10. 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.
11. Толковый словарь по термическим методам воздействия на нефтяные пласты / Д.Г. Антониади, Г.Г. Гиляев, А.Р. Гарушев, В.Г. Ишханов. – Краснодар: Советская Кубань, 2002. – 590 с.
12. О механизме пескопроявления при разработке слабосцементированных песчаных пластов с АВПД / В.Ю. Близнюков, А.Г. Гиляев, Р.Ф. Исламов, З.Х. Моллаев // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2010. – № 11. – С. 16–20.
13. Молчанов А.Г. К вопросу о металлоемкости штанговых глубиннонасосных установок // Нефтяное хозяйство. – 1972. – № 11. – С. 53–55.
14. The state of and prospects for using hardware-software simulators of electrotechnical complexes / A.M. Kostygov, E.M. Solodkii, A.V. Kukharchuk, A.M. Zyuzev, M.V. Mudrov, K.E. Nesterov // Russian Electrical Engineering. – 2015. – V. 86. – № 6. – P. 309–313.
15. Гиляев Г.Г. Повышение эффективности выработки трудноизвлекаемых запасов на сложнопостроенных нефтегазовых месторождениях. – Краснодар: Советская Кубань, 2003. – 297 с.
16. Solodkiy E.M., Varzanosov P.V., Belonogov A.A. Induction motor sensorless vector control with an adaptive speed observer and direct electrical angle correction in coordinate transformations // International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). – St. Petersburg, Russia, 2017. – P. 1–4.

17. Thongam J.S., Thoudam V.P.S. Stator flux-based speed estimation of induction motor drive using EKF // IETE journal of research. – 2004. – V. 50. – № 3. – P. 191–197.
18. Takacs G. Electrical submersible pumps manual: design, operations, and maintenance. – USA, Burlington, MA: Gulf Professional Publishing, 2009. – 440 p.
19. Мищенко И.Т. Скважинная добыча нефти. Нефть и газ. – М.: РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2003. – 816 с.
20. Гилаев Ген.Г., Хабибуллин М.Я., Гилаев 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.
21. Practice of using MexBIOS development studio technologies in educational process / E.M. Solodkiy, D.A. Dadenkov, A.A. Terehin, I.R. Yusupov // IX International Conference on Power Drives Systems (ICPDS). – Perm, Russian Federation, 2016. – P. 1–5.
22. Гилаев А.Г. Исследование влияния выноса мелких частиц продуктивного пласта на изменение нефтеотдачи низкопроницаемых коллекторов: дис. ... канд. техн. наук. – М., 2012. – 242 с.
23. Khabibullin M.Y. Managing the processes accompanying fluid motion inside oil field converging-diverging pipes // Journal of Physics: Conference Series. International Conference «Information Technologies in Business and Industry». – Novosibirsk, 2019. – P. 042012. DOI: 10.1088/1742-6596/1333/4/042012.
24. Гилаев Г.Г. Развитие теории и практики добычи трудноизвлекаемых запасов углеводородов на сложнопостроенных месторождениях: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – Тюмень, 2004. – 64 с.
25. Щуров В.И. Технология и техника добычи нефти. – М.: Альянс, 2005. – 510 с.
26. Сумский С.Н. Расчет кинематических и динамических характеристик плоских рычажных механизмов. Серия «Библиотека конструктора». – М.: Машиностроение, 1980. – 312 с.
27. Вульфсон И.И., Преображенская М.В., Шарпин И. А. Теория механизмов и машин: расчет колебаний привода. – М.: Юрайт, 2017. – 170 с.
28. Вульфсон И.И. Колебания машин с механизмами циклового действия. – М.: Машиностроение, 1990. – 309 с.

Поступила 30.06.2021 г.

Информация об авторах

Хабибуллин М.Я., кандидат технических наук, доцент кафедры нефтепромысловых машин и оборудования, Уфимский государственный нефтяной технический университет, филиал в г. Октябрьский.

UDC 622.276.53-83.001.24

METHODOLOGY OF DESIGNING THE TRANSFORMING MECHANISM PUMPING UNIT

Marat Ya. Khabibullin,
m-hab@mail.ru

Ufa State Petroleum Technological University, branch in Oktyabrsky,
54a, Devonskaya avenue, Oktyabrsky, 452607, Russia.

The relevance of the research is caused by the need to ensure more efficient operation of the kinematic scheme of the pumping unit. The solution to this problem will improve the operation of the kinematic scheme from the point of view of the loads arising in it and reduce the metal consumption of the surface drive of the sucker rod pump during its design.

The main aim of the research is to develop and propose a methodology for designing pumping unit during its production and manufacture.

Objects. The converting mechanism of the pumping units is a hinged four-link mechanism made according to symmetrical and asymmetrical kinematic schemes. With a symmetrical scheme, the center of rotation of the crank is on a straight line passing through the points corresponding to the extreme positions of the articulation of the connecting rod and the balance bar. All other cases correspond to an unbalanced scheme. At present, in accordance with the existing design technique of the symmetrical circuit converting mechanism, the kinematic ratios r/K and r/l are used as the initial data – the ratio of the crank radius to the length of the rear arm of the balancer and the connecting rod, respectively. The object of research is a hinge mechanism that converts the rotational motion of an electric motor into a reciprocating motion of the suspension point of the rods.

Methods. The technique that allows you to design a mechanism according to predetermined output parameters is more preferable and practical. At the same time, it is recommended to use parameters that directly determine both the type of the kinematic diagram of the converting mechanism and its overall dimensions. It should be noted that not all theoretically real mechanisms can be practically feasible. Therefore, the real area of angles ψ is somewhat narrower than the theoretical real area and should be determined taking into account the design features of the mechanism (for example, in an extremely close position to the body, the traverse should not touch the gearbox housing, the height of the mechanism should be such that in the lower position the suspension of the wellhead rod does not touch the wellhead oil seal, etc.). For convenience of using the proposed method, it is advisable to present the sought values in the given form (in fractions of the stroke length).

Results. According to the formulas obtained, using the data from catalogs of different companies, the reduced values of the kinematic parameters of the converting mechanisms of various kinematic schemes are calculated. As a result, we find that the overall dimensions of the converting mechanism of domestic pumping units of a symmetrical scheme (length by 45...60 %, and height by 25...30 %) are smaller than those of foreign pumping units of an asymmetrical scheme. The developed technique makes it possible to compare the technical and operational indicators of pumping units made according to various kinematic schemes. The proposed technique with the optimal position function, at which the dynamic loads on the drive are minimal, the efficiency of the downhole sucker rod pump is maximal, makes it possible to reduce the metal consumption of the pumping unit during its design.

Key words:

Four-link mechanism, symmetrical, asymmetrical, kinematic, scheme, angle, span.

REFERENCE

- Karaev I.K. Methods for designing the converting mechanism of pumping units. *Chemical and Oil and Gas Engineering*, 1986, no. 6, pp. 3–6. In Rus.
- Konnov Yu.D., Sidorkin D.I., Khabibullin M.Ya. Mechanization of the technological process of round-trip operations during routine and overhaul of wells. *SOCAR Proceedings*, 2018, no. 2, pp. 15–24. In Rus.
- Cheng Q., Yuan L. *Vector Control of an Induction Motor based on a DSP*. Master of Science Thesis. Sweden, Gothenburg, 2011. 76 p.
- Comnac V., Cernat M., Cotorogea M., Draghici I. Sensorless direct torque and stator flux control of induction machines using an extended Kalman filter. *IEEE Int. Conf. on Control Appl.* Mexico City, Mexico, 2001. pp. 674–679.
- Arkhipov K.I., Popov V.I., Popov I.V. *Spravochnik po stankam-kachalkam* [Handbook on pumping units]. Almeteyevsk, Tatneft Publ., 2000. 146 p.
- Khabibullin M.Ya. Managing the reliability of the tubing string in impulse non-stationary flooding. *Journal of Physics: Conference Series. International Conference «Information Technologies in Business and Industry»*. Mechatronics, Robotics and Electrical Drives. Novosibirsk, 2019. pp. 052012. DOI: 10.1088/1742-6596/1333/5/052012.
- Gibbs S.G. *Rod pumping. Modern methods of design, diagnosis and surveillance*. USA, Ashland, OH, BookMasters Inc., 2012. 682 p.
- Bliznyukov V.Yu., Gilaev A.G., Gilaev G.G., Eganyants R.T. Substantiation of the conditions for calculation and selection of strength characteristics of production columns of the Sladkovsko-Morozov group of fields. *Construction of oil and gas wells on land and at sea*, 2010, no. 2, pp. 31–38. In Rus.
- Molchanov A.G. Pumping machines: problems and prospects for improvement. *Industrial statements*, 2007, no. 10, pp. 45–60. In Rus.
- Khabibullin M.Ya. Improvement of 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. In Rus.
- Antoniadi D.G., Gilaev G.G., Garushev A.R., Ishkhanov V.G. *Tolkovy slovar po termicheskim metodam vozdeystviya na nefyanye plasty* [Explanatory dictionary on thermal methods of impact on oil reservoirs]. Krasnodar, Soviet Kuban Publ., 2002. 590 p.
- Bliznyukov V.Yu., Gilaev A.G., Islamov R.F., Mollaev Z.Kh. On the mechanism of sand production in the development of weakly cemented sand reservoirs with abnormal formation pressure. *Construction of oil and gas wells on land and at sea*, 2010, no. 11, pp. 16–20. In Rus.
- Molchanov A.G. On the question of the metal consumption of sucker-rod deep pumping units. *Oil industry*, 1972, no. 11, pp. 53–55. In Rus.
- Kostygov A.M., Solodkii E.M., Kukharchuk A.V., Zyuzev A.M., Mudrov M.V., Nesterov K.E. The state of and prospects for using hardware-software simulators of electrotechnical complexes. *Russian Electrical Engineering*, 2015, vol. 86, no. 6, pp. 309–313.
- Gilaev G.G. *Povyshenie effektivnosti vyrabotki trudnoizvlekatnykh zapasov na slozhnopostroennykh neftegazovykh mestorozhdeni-*

- yakh [Improving the efficiency of developing hard-to-recover reserves at complex oil and gas fields]. Krasnodar, Soviet Kuban Publ., 2003. 297 p.
16. Solodkiy, E.M., Varzanosov P.V., Belonogov A.A. Induction motor sensorless vector control with an adaptive speed observer and direct electrical angle correction in coordinate transformations. *International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*. St. Petersburg, Russia, 2017. pp. 1–4.
 17. Thongam J.S. Stator flux-based speed estimation of induction motor drive using EKF. *IETE journal of research*, 2004, vol. 50, no. 3, pp. 191–197.
 18. Takacs G. *Electrical submersible pumps manual: design, operations, and maintenance*. USA, Burlington, MA, Gulf Professional Publishing, 2009. 440 p.
 19. Mishchenko I.T. *Skvazhinnaya dobycha nefi. Neft i gaz* [Down-hole oil production. Oil and gas]. Moscow, I.M. Gubkin Russian State University of Oil and Gas Publ., 2003. 816 p.
 20. Gilaev Gen.G., Khabibullin M.Ya., Gilaev G.G. Prospects for the use of acid gel for pumping proppant in the process of hydraulic fracturing of carbonate formations in the Samara region. *Oil industry*, 2020, no. 8, pp. 54–57. In Rus. DOI: 10.24887/0028-2448-2020-8-54-57.
 21. Solodkiy E.M., Dadenkov D.A., Terekhin A.A., Yusupov I.R. Practice of using MexBIOS Development Studio technologies in educational process. *IX International Conference on Power Drives Systems (ICPDS)*. Perm, Russian Federation, 2016. pp. 1–5.
 22. Gilaev A.G. *Issledovanie vliyaniya vynosa melkikh chastits produktivnogo plasta na izmenenie nefteotdachi nizkopronitsaemykh kollektorov*. Dis. Kand. nauk [Study of the influence of shedding small particles of productive formation on the change in oil recovery of low permeable reservoirs. Cand. Diss. Abstract]. Moscow, 2012. 242 p.
 23. Khabibullin M.Y. Managing the processes accompanying fluid motion inside oil field converging-diverging pipes. *Journal of Physics: Conference Series. International Conference «Information Technologies in Business and Industry»*. Novosibirsk, 2019. pp. 042012. DOI: 10.1088/1742-6596/1333/4/042012.
 24. Gilaev G.G. *Razvitiye teorii i praktiki dobychi trudnoizvlekaemykh zapasov uglevodorodov na slozhnopostroennykh mestorozhdeniyakh*. Avtoreferat Dis. Dokt. nauk [Development of the theory and practice of producing hard-to-recover reserves of hydrocarbons on complex deposits. Dr. Diss. Abstract]. Tyumen, 2004. 64 p.
 25. Shchurov V.I. *Tekhnologiya i tekhnika dobychi nefi* [Oil production technology and technique]. Moscow, Alliance Publ., 2005. 510 p.
 26. Sumskiy S.N. *Raschet kinematicheskikh i dinamicheskikh kharakteristik ploskikh rychazhnykh mekhanizmov. Seriya «Biblioteka konstruktora»* [Calculation of kinematic and dynamic characteristics of flat lever mechanisms. series: designer library]. Moscow, Mashinostoenie Publ., 1980. 312 p.
 27. Wolfson I.I., Preobrazhenskaya M.V., Sharapin I.A. *Teoriya mekhanizmov i mashin: raschet kolebany privoda* [Theory of mechanisms and machines: calculation of drive oscillations]. Moscow, Yurayt Publ., 2017. 170 p.
 28. Wulfson I.I. *Kolebaniya mashin s mekhanizmami tsiklovogo deystviya* [Oscillations of machines with cyclic action mechanisms]. Moscow, Mashinostoenie Publ., 1990. 309 p.

Received: 30 June 2021.

Information about the authors

Marat Ya. Khabibullin, Cand. Sc., associate professor, Ufa State Petroleum Technological University, branch in Oktyabrsky.

УДК 553.98:551.8:551.734.3:551.243.31(235.223)

ПАЛЕОГЕОГРАФИЧЕСКИЕ, ЛИТОЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ И БИТУМИНОЗНОСТЬ ЖИВЕТСКИХ ОТЛОЖЕНИЙ СРЕДНЕГО ДЕВОНА АЛТАЕ-САЯНСКОЙ СКЛАДЧАТОЙ ОБЛАСТИ

Шаминава Марина Ивановна¹,
mshaminova@mail.ru

Рычкова Ирина Владимировна¹,
irina.rychkova@mail.ru

Саар Кристина Николаевна²,
saar.kris@mail.ru

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

² АО «Якутскгеология» Алданское ОП,
Россия, 677009, г. Якутск, ул. Кальвицына, 24.

Актуальность исследования обусловлена недостаточной изученностью палеозойских нефтегазоносных отложений Западной Сибири и сопряженной с ней Алтае-Саянской складчатой области, хотя на этой территории недавно открыты новые месторождения нефти и газоконденсата. Палеозойские отложения являются высокоперспективным объектом для открытия месторождений углеводородов. Результаты палеогеографических и литолого-геохимических исследований изучаемого региона могут существенно повлиять на реконструкцию палеообстановок, благоприятных для генерации и аккумуляции УВ, а также оценку перспектив нефтегазоносности палеозойских отложений и выявление нетрадиционных коллекторов.

Объекты: карбонатные породы живетского яруса среднего девона, обнажающиеся в карьерах Камень и Подломск (Томская область), Лебедянском карьере (Кемеровская область), в районах оз. Фыркал и Ошколь, а также западное оз. Тус (Северная Хакасия).

Цель: палеогеографическая реконструкция обстановок осадконакопления, благоприятных для нефте- и газонакопления, а также выявление и оценка перспектив нефтегазоносности палеозойских отложений в породах палеозойского фундамента.

Методы: литолого-петрографические, палеонтологические, палеогеографические, литогеохимические (метод рентгено-спектрального анализа, люминесцентно-микроскопический, растровой электронной микроскопии, ICP-MS).

Результаты. Авторами впервые установлены признаки нефтегазоносности среднедевонских отложений в Томской области (карьеры Камень и Подломский), в Кемеровской области (Лебедянский карьер), в Северной Хакасии (районы оз. Фыркал и Ошколь, а также западное оз. Тус). В результате палеонтологических и геохимических исследований выявлены особенности палеосреды осадконакопления, благоприятной для аккумуляции ОВ, захоронения и генерации УВ. Среди изученных отложений выделены петротипы: баундстоун, рудстоун, флаутстоун, пакстоун, вакстоун и мадстоун, которые претерпели интенсивные постседиментационные преобразования, что существенно повлияло на их коллекторские свойства. Люминесцентно-микроскопические исследования позволили установить факты интенсивной флюидомиграции в изученных районах и выделить потенциальные коллекторы. Выяснено, что наибольшее количество битумоидов фиксируется в рифогенных известняках-баундстоун. Этот петротип обладает высоким коллекторским потенциалом, т. к. слагающие его кораллы обладают хорошими для этого качествами – кавернозностью и биопустотностью.

Ключевые слова:

Алтае-Саянская складчатая область, живетские отложения, средний девон, битуминозность, петротипы.

Введение

Исследование палеозоя Алтае-Саянской складчатой области (АССО) имеет достаточно длинную историю. Однако в настоящее время возник повышенный интерес к изучению нетрадиционных коллекторов на данной территории [1–3]. Проведение палеорекострукций и решение вопросов, связанных с условиями их седиментогенеза, отразится на оценке перспектив генерации и аккумуляции углеводородов (УВ) глубоких горизонтов молодой эпигерцинской Западно-Сибирской платформы.

Объектом исследования являются карбонатные отложения (живет, средний девон), распространенные в АССО (карьеры Камень и Подломский в Томской области, карьер Лебедянский в Кемеровской области, обнажения в районах оз. Фыркал, Ошколь, западное оз. Тус в Северной Хакасии).

Изученные отложения представляют собой локальные выходы живетского яруса среднего девона в пределах АССО [4]. Это позволяет установить продолжение складчатого фундамента и сделать выводы об специфичности их формирования и битуминозности [5–8].

Литологическая характеристика отложений

Породы живетского яруса в изучаемых районах представлены преимущественно органогенными и биохемогенными известняками, окраска которых изменяется в светло-серых тонах. Характерными структурами являются биоморфные. Текстуры неоднородные, на отдельных участках пятнистые. В породах отмечается примесь терригенного материала алевритовой размерности.

Известняки подвергнуты интенсивным вторичным преобразованиям, среди которых преобладает перекристаллизация с укрупнением зерен, кальцитизация и доломитизация по трещинам и кавернам. Часто отмечается выщелачивание, которое проявляется в возникновении пустот и полостей, заполненных органическим битуминозным веществом. Среди изученных карбонатных пород было выделено несколько петротипов, согласно классификации Р.Х. Данхема, А. Эмбри и Дж. Кловена [9].

В карьерах Камень и Подломский были выделены петротипы: баундстоун, пакстоун, мадстоун. В карьере Лебедянский: баундстоун, рудстоун. В районе оз. Фыркал выделены петротипы: флаутстоун, пакстоун, вакстоун. Среди известняков в районе оз. Ошколь и западнее оз. Тус были выделены три петротипа: пакстоун, вакстоун, мадстоун.

Баундстоун – известняк автохтонный, рифогенный, на отдельных участках перекристаллизованный (с укрупнением зерен). Этот известняк биогенный, формируется из компонентов организмов в положении роста, с сохранением органогенного каркаса и полостей между скелетами, выполненных микрозернистым кальцитом, обломками

организмов и их смесью. В породах Лебедянского карьера встречаются ископаемые остатки: строматопораты, криноидеи, кораллы-табуляты (*Thamnopora cervicornis* В., *Thamnopora* sp., *Pachyfavosites polymorphus* G.), кораллы-ругозы *Thamnophyllum* sp. (рис. 1), *Heliophyllum* sp., *Pseudomicroplasma fongi* Y.), трилобиты (*Phacops (Phacops) altaicus* T.), брахиоподы (*Acrospirifer cheehiel* K.).

Возраст отложений датирован как живетский по фауне брахиопод и кораллов [10]. В баундстоунах кроме скелетной составляющей присутствовали фито- и зоопланктон, преобразованные в дальнейшем в сингенетично-битуминозное вещество.

Формирование подобной рифогенной постройки проходило на участке теплого, нормально-соленого моря при хорошей освещенности, в некотором удалении от береговой линии, без привноса терригенного материала, о чем свидетельствуют стенобионтные кораллы. Данная рифовая постройка может служить хорошим коллектором для мигрирующих углеводородов, т. к. слагающие ее кораллы обладают хорошим потенциальным для этого качеством – кавернозностью и биопустотностью (рис. 2).



Рис. 1. Рифогенный известняк из карьера Лебедянский, кораллы *Thamnophyllum* sp.

Fig. 1. Rifogenic limestone of the Lebedyansky quarry, corals *Thamnophyllum* sp.

Рудстоун – аллохтонный известняк песчаный, детритовый, плотный, серый. Данные известняки содержат более 10 % зерен размером более 2 мм, с плотной упаковкой компонентов. В породах встречаются обломки брахиопод, криноидей и мшанок. Известняки песчаные детритовые плотные серые.

Флаутстоун – это аллохтонный известняк, содержащий в себе кальцитовые зерна (преимущественно их размер составляет 0,01...0,24 мм). Иногда в породе встречаются зерна более крупные, размер которых достигает 4,7 мм, но таких отдельных обломков очень мало, и они не превышают 10 % от всей массы породы. Процесс выщелачивания в известняках обуслав-

ливает появление пор и каверн, которые имеют размеры до 3,85 мм. В известняках имеются трещинки, которые заполнены битуминозным веществом. Среди особенностей этого петротипа выделяется наличие стилолитовых швов.

Пакстоун – это аллохтонный известняк, на 80–85 % сложен органическими остатками. Практически все они представляют собой округлые биогенные образования в виде комочков, сферической формы – онколиты, размер которых варьирует 0,02... 0,16 мм. Петротип характеризуется большим содержанием пор и каверн, размеры которых 0,09... 3,6 мм. Морфология пустот неправильная, щелевидная, заливообразная.

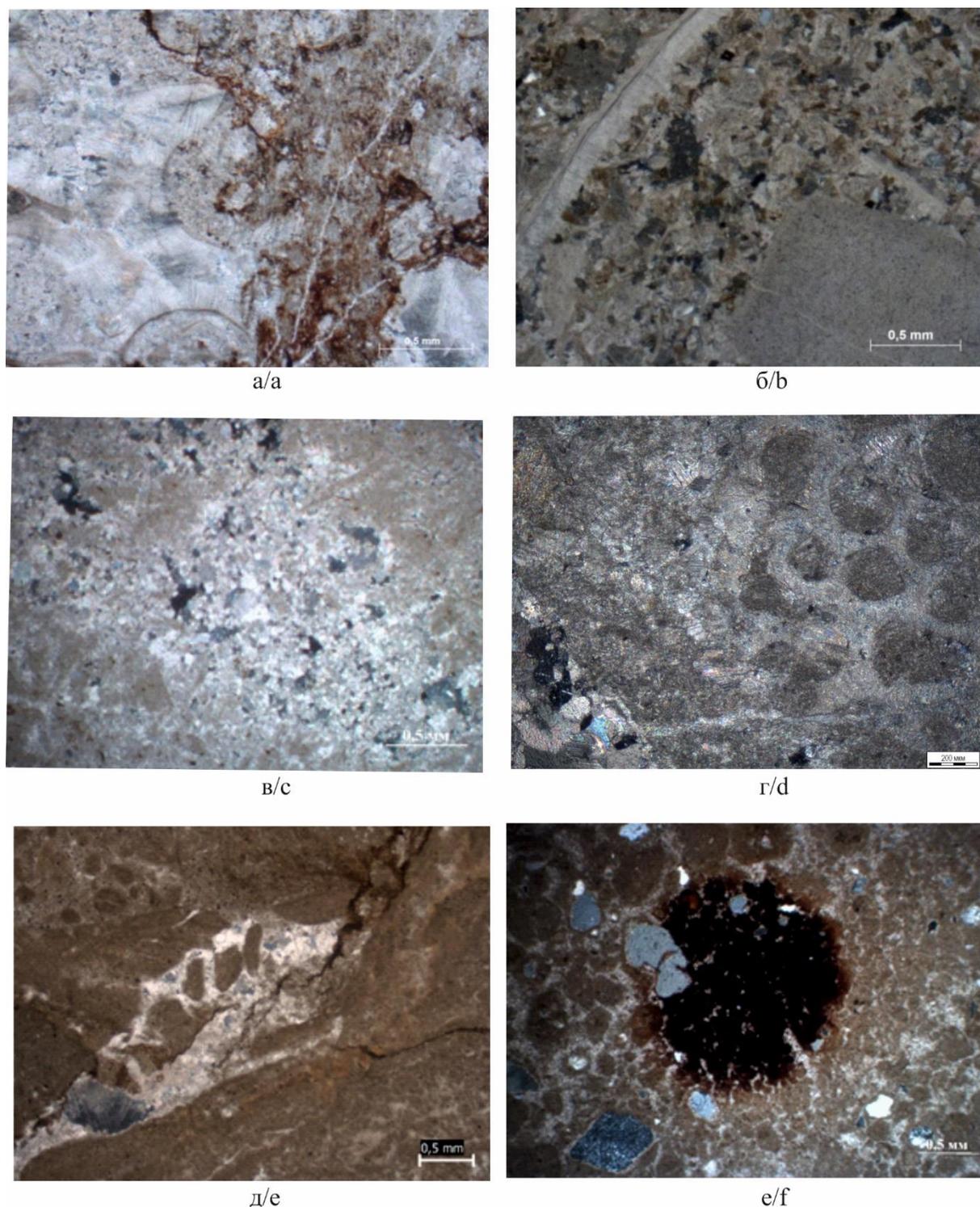


Рис. 2. Выделенные петротипы: а) баундстоун (карьер Лебедянский); б) рудстоун (карьер Лебедянский); в) флаут-стоун (р-н оз. Фыркал); г) пакстоун (карьер Камень); д) вакстоун (р-н оз. Фыркал); е) мадстоун (р-н оз. Ошколь)

Fig. 2. Highlighted petrotypes: a) boundstone (Lebedyansky quarry); b) rudstone (Lebedyansky quarry); c) floatstone (lake Fyrkal area); d) packstone (Kamen quarry); e) wackstone (lake Fyrkal area); f) madstone (lake Oshkol area)

На стенках пор и подводящих к ним трещинах отмечается битуминозное вещество. В дальнейшем, в процессе катагенеза, поры выщелачивания были заполнены карбонатами. Зерна кальцита в порах и кавернах имеют размеры до 0,49 мм, а доломита – 0,07...0,4 мм. Кроме того, породы, относящиеся к

пакстоуну, интенсивно окремнены. Кремнистые минералы (халцедон и кварц) отмечаются в зёрнах с размерами 0,03...0,17 мм. Отложения могли формироваться в зоне прибрежного мелководья, где интенсивно проявляются процессы волнений и течений.

Вакстоун – аллохтонный известняк, сложенный сгустками микрозернистого материала (размер частиц 0,06...0,4 мм) различных форм – от неправильной до сферической и овальной. Породы сложены преимущественно кальцитом. Катагенетические преобразования проявились в доломитизации открытых трещин, причем этот процесс проходил позднее поступления битуминозного вещества. Размеры зерен доломита не превышают 0,95 мм. Кроме этого, в породах вакстоуна фиксируется доломитизация остатков раковин безпозвоночных (остракод и фораминифер). Для этих известняков характерна послойная битуминизация. Отмечаются четкие контакты слоев, обогащенных битуминозным ОВ, переслаивающихся с комковатосгустковой микрозернистой массой. В породах практически отсутствуют поры и каверны. Данный тип известняка характеризует обстановки открытых платформ, относительно заглубленной части шельфа ниже базиса действия волнового воздействия.

Мадстоун – аллохтонный известняк, основную массу которого составляет микрозернистый кальцит с размером зерен до 0,23 мм, сцементированный гидрослюдами. В породах иногда встречаются измененные обломки кварца, размер которых варьирует 0,02... 0,88 мм. Обломки кварца корродированы и регенерированы, толщина каемок до 0,01 мм. Кроме того, в породе отмечаются обломки мелкозернистого алевролита. Пористость и кавернозность в этих породах не наблюдается. Петротип характеризуется наличием стилолитовых забитуминизированных швов шириной до 0,04 мм. В породах присутствуют мелкие трещинки, которые тоже заполнены битуминозным веществом, а большие рукавообразные трещины заполнены гидрослюдистым цементом или микрозернистым кальцитом. В целом битуминозное вещество распределено по всей породе неравномерно. Из органических остатков встречаются фораминиферы, гастроподы и колонии мшанок. Мадстоун мог формироваться в местах штормового воздействия.

Постседиментационные преобразования и их влияние на коллекторские свойства

Изученные породы подверглись интенсивным постседиментационным преобразованиям: перекристаллизации, выщелачиванию, доломитизации, микростилолитизации, окремнению (рис. 3), что в целом привело к разуплотнению пород. Именно на таких участках отмечается повышенная битуминозность.

В породах, в которых присутствует примесь кремнистого и глинистого материала, отмечаются следующие типы перекристаллизации: рассеянный, прожилковый, кружевной, пятнистый. Катагенетические преобразования также изменили первоначальный облик породы, о котором можно судить только по реликтовым структурным признакам.

В единичных случаях в породах зафиксирована перекристаллизация с уменьшением зерен (микритизация), которая чаще всего отмечается в баундстоунах.

Неравномерное катагенетическое выщелачивание в известняках привело к увеличению пористости и проницаемости пород, что оказало достаточно сильное влияние на формирование их фильтрационно-емкостных свойств.

Циркуляция в известняках поровых вод привела к формированию пустот различных форм и размеров. Морфология пор преимущественно неправильная, изометричная, заливообразная. Иногда пустоты выщелачивания приводят к раздувам открытых трещин, которые в последствии могут быть заполнены аутигенными минералами (доломитом) и битуминозным веществом. Размеры пор изменяются от 0,01 до 4,0 мм.

Катагенетическая доломитизация распределяется неравномерно в матриксе породы. Обычно замещаются сначала реликтовые компоненты, а затем доломит появляется на участках постдиагенетической перекристаллизации и окремнения, а также отмечается приуроченность ромбоэдрических зерен доломита, обладающих нередко зональным строением, к наиболее проницаемым участкам (трещинам, кавернам, микростилолитовым швам). Иногда в зернах доломита фиксируются реликтовый кальцит.

Кислые подземные воды способствовали окремнению карбонатных пород, при этом отмечается заполнение кремнеземом отдельных интерстиций, пустот выщелачивания с образованием преимущественно халцедона. Изредка халцедон замещает крупные кристаллы кальцита с образованием радиально-лучистого агрегата. Еще реже в пустотах отмечаются новообразованные зерна кварца с хорошей кристаллографической огранкой. Размеры зерен кремнистых минералов изменяются от сотых до десятых долей мм. Окремнение, как правило, неравномерное, пятнистое.

В породах часто развита разнонаправленная трещиноватость. Кроме этого, почти во всех образцах фиксируются единичные микростилолиты, швы которых заполнены органоминеральной смесью, состоящей из глинистого и битуминозного вещества. Максимальная ширина швов до 0,06 мм. Такие текстурные признаки характерны для известняков, подвергшихся растворению под давлением, в результате чего швы микростилолитов в дальнейшем обогащаются битуминозными компонентами.

Люминесцентно-микроскопический анализ битумоидов и органического вещества

В изученных в ультрафиолетовом свете (УФ) карбонатных отложениях живецкого возраста АССО было обнаружено битуминозное вещество (рис. 4). Практически во всех образцах отмечаются следы миграции битумоидов, что свидетельствует о проявлении в разрезе процессов флюидомиграции. Содержание битумоидов и их состав меняется по петротипам [11, 12]. Наибольшее количество битумоидов зафиксировано в рифогенных известняках баундстоун (карьер Камень, Подломский, Лебедянский). Минимальное содержание битумоидов отмечается в петротипе мадстоун района оз. Фыркал.

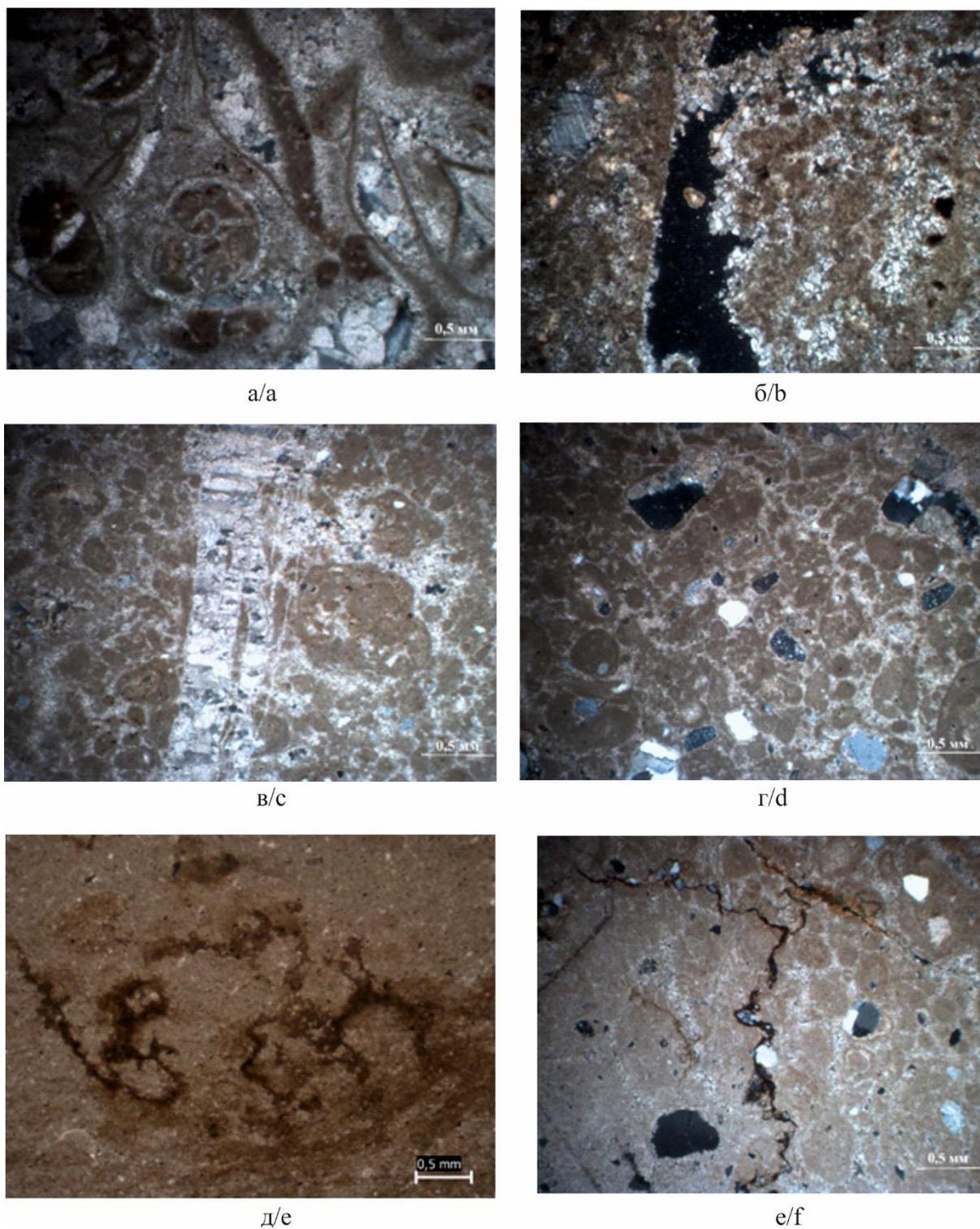


Рис. 3. Постседиментационные преобразования в образцах р-на оз. Фыркал (николи скрещенные): а) перекристаллизация пустотных пространств и раковин; б) пустоты выщелачивания неправильной формы; в) доломитизация широких рукавообразных трещин; г) процесс окремнения, образование отдельных зерен кварца; д, е) микростилолитовые швы (р-н оз. Ошколь)

Fig. 3. Postsedimentary transformations in the samples of the lake Fyrkal area (Nicolas crossed): а) recrystallization of voids and cavities; б) leaching voids of irregular shape; в) dolomitization of wide sleeve-like cracks; д) silicification, formation of individual quartz grains; е, f) microstylolite seams (lake Oshkol area)

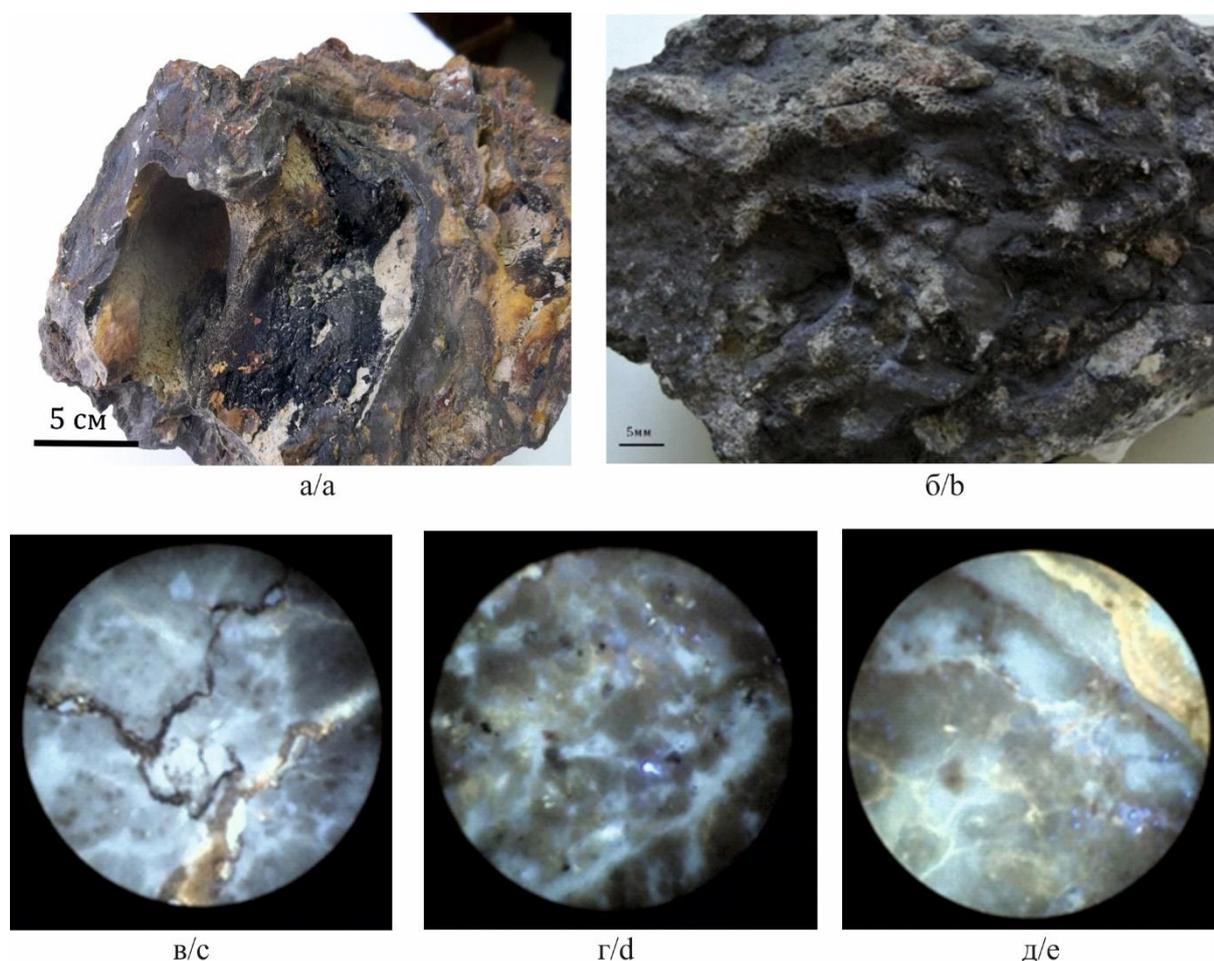


Рис. 4. Породы, пропитанные битуминозным веществом: а) образец с выделениями твердых битумов (карьер Камень); б) коралловый известняк (баундстоун), пропитанный битуминозным веществом (карьер Лебедянский); в–д) известняки под люминесцентным микроскопом, увел. 62; в) мадстоун (р-н оз. Ошколь); г) вакстоун (р-н оз. Ошколь); д) пакстоун (западнее оз. Тус)

Fig. 4. Rocks impregnated with bituminous matter: a) sample with solid bitumen excretions (Kamen quarry); b) coral limestone (boundstone), impregnated with bituminous substance (Lebedyansky quarry); c–e) limestones under fluorescent microscope, zoom in 62; c) madstone (lake Oshkol area); d) wackstone (lake Oshkol area); e) packstone (west of the lake Tus)

В процессе проведения люминесцентного анализа образцов установлено, что во всех петротипах, кроме баундстоуна и пакстоуна, преобладают эпигенетические битумоиды, состав которых изменяется от маслянистого (желтое свечение) до смолистого (буровато-коричневое свечение). Содержание эпитумоидов во всех петротипах, кроме рифогенных и органогенных известняков, зависит преимущественно от текстурно-структурных особенностей породы и интенсивности постседиментационных преобразований. Характерными битуминозными текстурами являются пятнистые и трещинные, структуры – неравномерно и равномерно рассеянные. Установлено, что в трещинах, микростилолитовых швах, перифериях каверн присутствуют преимущественно битумоиды смолисто-асфальтенового состава (буровато-коричневое свечение), а в основной массе породы отмечаются более легкие фракции маслянисто-смолистого (буроватое свечение) и маслянистого (желтоватое свечение) состава, что свидетельствует о миграции УВ из трещин в породу.

В рифогенных (баундстоун) и органогенных (пакстоун) известняках в целом содержание битумоидов наиболее высокое, так как текстурно-структурные особенности пород обуславливают их большую пористость и проницаемость. Кроме эпигенетических в таких известняках обнаружены сингенетические битумоиды, которые равномерно пропитывают основную массу породы и характеризуются широким диапазоном состава (от маслянистого до смолисто-асфальтенового).

Литогеохимические инструменты реконструкции формирования отложений

Комплексное исследование отложений геохимическими методами позволило уточнить фациальные обстановки и геохимию среды седиментогенеза [13, 14].

Геохимическая специализация выделенных петротипов карбонатных пород была проведена с помощью растровой электронной микроскопии и рентгеноспектрального микроанализа.

Результаты растровой электронной микроскопии свидетельствуют о чистоте состава рифогенных (баундстоун) известняков, состоящих преимущественно из кальцита с незначительной примесью Fe, Mg, Si, S, P и др.

В результате рентгеноспектрального микроанализа уточнен химический состав петротипов. Так, например, химический состав пакстоуна представлен кальцитом, в котором содержится небольшое количество кремния и железа (рис. 5).

Флаутстоун содержит в примесях элементы: кремний, алюминий, кальций, магний и фосфор, но они имеют небольшое содержание в породе. Преобладающим компонентом является железо.

Вакстоун отличается высоким содержанием железа, установлено среднее значение кремния и кальция, а также минимальные значения алюминия, магния, цинка и фосфора.

Для реконструкции физико-химической и тектонической обстановки седиментогенеза с помощью масс-спектрометрии с индуктивно-вязанной плазмой (ICP-MS) были изучены образцы из разных петротипов, в каждом из которых определялись 40 химических элементов, которые нормировались к составной пробе палеозойских глинистых сланцев Северной Америки (NASC – NorthAmericanShaleComposite) [15, 16].

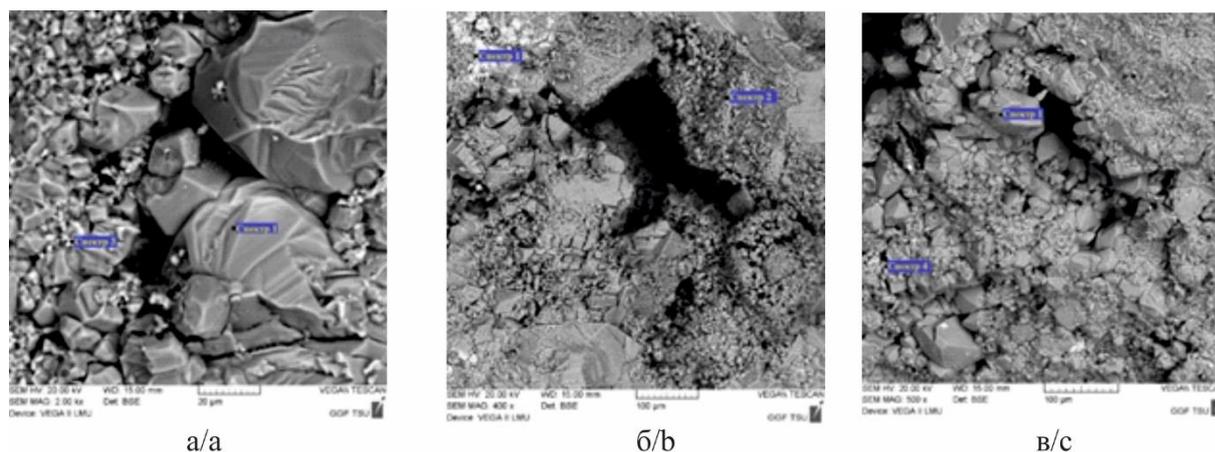


Рис. 5. Результаты рентгеноспектрального микроанализа: а) пакстоун (р-н оз. Фыркал); б) флаутстоун (р-н оз. Фыркал); в) вакстоун (р-н оз. Ошколь)

Fig. 5. Results of X-ray spectral microanalysis: a) packstone (lake Fyrkal area); b) floutstone (lake Fyrkal area); c) wackstone (lake Oshkol area)

Анализ мультиэлементных диаграмм, построенных по результатам ICP-MS, показал, что в карбонатных породах районов оз. Фыркал, Ошколь и западное оз. Тус присутствуют редкоземельные элементы, и выявил, что условия осадконакопления были мелководно-морские.

Концентрация элементов Sr и Ni на диаграмме оказалась выше кларковых значений, содержание Zn близкое к кларку. На диаграмме выявлена небольшая стронциевая аномалия, которая может быть интерпретирована как признак формирования отложений в условиях крайнего мелководья [17, 18].

Вычисленное значение индикатора палеосолености (Sr/Ba) [19] является доказательством морских условий осадконакопления. Известным фактом является то, что в результате процессов химического выветривания происходит совместная миграция таких элементов, как стронций и барий. Они попадают в морские водоёмы, в которых барий быстро коагулируется в прибрежных условиях с $(SO_4)_2$ и выпадает в осадок. Стронций же осаждается только тогда, когда соленость воды достигает $15 \text{ }^\circ\text{o}$.

Кроме этого, выявленная в породах цериевая аномалия Ce/Ce* подтверждает выводы о формировании отложений в морских условиях. Установлено, что церий может окисляться и переходить в растворимую форму в условиях морского седиментогенеза, что

проявлено в форме отрицательной цериевой аномалии, и значение отношения становится меньше 1 (табл. 1).

Таблица 1. Отношение Sr/Ba как индикатора палеосолености

| № образца/Sample no. | 1Ф-С | 3Ф-С | 4Ф-С | 5Ф-С | 6Ф-С |
|----------------------|-------|-------|------|-------|------|
| Sr/Ba | 43,34 | 27,83 | 19,3 | 20,63 | 14,7 |
| Ce/Ce* | 0,24 | 0,18 | 0,16 | 0,22 | 0,3 |

Для уточнения состава карбонатных пород рентгенофлуоресцентным методом изучены образцы с Северной Хакасии. По результатам применения этого метода построена диаграмма для карбонатных пород MgO-CaO. Все фигуративные точки исследуемых пород находятся в зоне собственно известняков или доломитовых известняков. Кроме этого, был подсчитан индикатор положения осадков на фациальном профиле Fe/Mn. Анализ результатов (25,47...44,54) свидетельствует об относительно мелководном морском режиме осадконакопления (табл. 2).

Таблица 2. Соотношение Fe/Mn

| № образца/Sample no. | 0Ф-С | 5Ф-С | О-01К | Т-12К |
|----------------------|-------|------|-------|-------|
| Fe/Mn | 28,25 | 43,9 | 25,47 | 44,54 |

Заключение

Палеорекострукция живетских карбонатных отложений в пределах АССО на основе комплекса методов палеонтологических и литогеохимических исследований позволила выявить особенности палеосреды осадконакопления, благоприятной для аккумуляции ОВ, захоронения и генерации УВ.

В изученных обнажениях были обнаружены окаменелости, датирующие возраст отложений как живетский (брахиоподы *Acrospirifer cheehiel* К., кораллы *Thamnopora cervicornis* В. и др.). Бассейн седиментации характеризовался условиями нормально-соленого, теплого, морского мелководья. На некоторых участках бассейна шло формирование рифогенных построек (территория карьеров Камень, Подломский, Лебедянский), в некотором удалении от береговой линии, без привноса терригенного материала, о чем свидетельствуют стенобионтные кораллы.

Это также подтверждается расчетом индикаторов палеосолености (Sr/Ba : 43, 34... 14,7), палеогеографической позицией отложений в пределах бассейна седиментации Ce/Ce^* (0,16...0,24), положения осадков на фациальном профиле Fe/Mn (28, 25...44, 54) [19].

В отложениях живетского яруса изученных районов выделены шесть петротипов карбонатных пород: баундстоун, мадстоун, вакстоун, пакстоун, флаутстоун и рудстоун.

Породы интенсивно изменены постседиментационными процессами: перекристаллизацией с укрупнением зерен, микростилолитизацией, окремнением, доломитизацией и выщелачиванием, что способствовало образованию трещин, пор и каверн. Эти преобразования имеют влияние на приобретение фильтрационно-емкостных свойств данных известняков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Нефтегазоперспективные объекты палеозоя Западной Сибири, сейсмогеологические модели эталонных месторождений / В.А. Конторович, Л.М. Калинина, А.Ю. Калинин, М.В. Соловьев // Геология нефти и газа. – 2018. – № 4. – С. 5–15.
2. Геология и минералогия Северной Хакасии / Ю.С. Ананьев, Б.Д. Васильев, С.С. Гудымович, И.И. Коптев, Н.А. Макаренко, В.П. Парначев, С.В. Парначев, М.Г. Танзыбаев, А.Ю. Фальк. – Томск: ТПУ, 2006. – 238 с.
3. Конторович В.А., Калинина Л.М. Геологическое строение и нефтегазоносность палеозоя Западной Сибири, модели эталонных месторождений // Бурение и нефть. – 2019. – № 11. – С. 18–25.
4. Лобова Г.А., Лунёва Т.Е., Исаева О.С. Нефтегазоносность коры выветривания и палеозоя Колтогорского мезопрогиба (северо-запад Томской области) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330. – № 9. – С. 103–113.
5. Embrym A.F., J.E. Klován A late Devonian reef tract on north heastehñ Bancks Island Northwest Territories // Bulletin of Canadian Petroleum Geology. – 1971. – V. 19. – № 4. – P. 730–781.
6. Longman M.W. Carbonate diagenetic textures from nearshore diagenetic environments // AAPG. Bulletin. – 1980. – V. 64. – № 4. – P. 461–487.
7. Ржонсницкая М.А. Полевой атлас характерных комплексов фауны и флоры девонских отложений Минусинской котловины. – М.: Госгеолтехиздат, 1955. – 140 с.
8. Уилсон Дж.Л. Карбонатные фации в геологической истории. – М.: Недра, 1980. – 463 с.
9. Danham R.J., Ham W.E. Classification of carbonate rocks according to depositional texture Classification of carbonate rocks // Symposium American Association of Petroleum Geologists. – 1962. – V. 1. – P. 108–121.
10. Kuramshin R.M., Chernitskiy A.V., Gula E.V. Differential estimation of oil reserves based on carbonate reservoir classification (Russian) // Нефтяное хозяйство. – 2019. – № 5. – С. 48–50.
11. Юдович Я.Э. Проблема геохимической диагностики фации седиментогенеза. – Томск: ТГУ, 2007. – 188 с.
12. Scholle P.A., Ulmer-Scholle D.S. Color guide to the petrography of carbonate rocks: grains, textures, porosity, diagenesis // AAPG. Memour 77, Tulsa, 2003. – 474 p.
13. Кузьмин В.А. Цифровая формализация микроструктурных параметров карбонатных коллекторов на основе Фурье-анализа // Актуальные проблемы нефти и газа. – 2018. – Вып. 1 (20). – С. 1–15.
14. Рид С.Дж.Б. Электронно-зондовый микроанализ и растровая электронная микроскопия в геологии. – М.: Техносфера, 2008. – 232 с.
15. Haskin M.A., Haskin L.A. Rare earths in European shales: a redetermination // Science. – 1966. – V. 154. – P. 507–509.
16. Rare earth elements in Japan Sea sediments and diagenetic behaviour of Ce/Ce^* : results / P.W. Murray, M.R. Buchholtzen, H.J. Brumsack, D.C. Gerlach, G.P. Russ // Geochimica et Cosmochimica Acta. – 1991. – V. 55. – P. 2453–2466.
17. BJORLİKKE K. Sedimentology and petroleum geology. – Berlin: Springer, 1989. – 363 p.
18. Tucker M.E., Wright V.P., Dickson J.A. Carbonate Sedimentology. – Oxford: Blackwell, 1990. – 482 p.

19. Immenhauser A. Towards a definition of the deep burial realm in carbonate diagenesis // 34th International Meeting of Sedimentologists: abstract book. – Rome, 2019. – P. 1170.
20. Domanic type deposits – target object of prospecting works (Russian) / S.V. Bagmanova, P.V. Pankratiev, I.V. Synkova, A.S. Stepanov, A.V. Kolomoets // Нефтяное хозяйство. – 2018. – № 12. – С. 92–96.
21. Новые данные о специфических условиях формирования турнейских отложений Кольвань-Томской складчатой зоны / М.И. Шаминава, А.А. Поцелуев, И.В. Рычкова, Я.Ю. Корчуганов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2016. – Т. 327. – № 3. – С. 16–22.

Поступила 23.06.2021 г.

Информация об авторах

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

Рычкова И.В., кандидат геолого-минералогических наук, доцент отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Саар К.Н., геолог 1 категории АО «Якутскгеология» Алданское ОП.

UDC 553.98; 551.8: 551.734.3: 551.243.31 (235,223)

PALEO GEOGRAPHIC, LITHOLOGICAL-GEOCHEMICAL FEATURES AND BITUMINITY OF ZHIVETIAN DEPOSITS OF THE MIDDLE DEVONIAN OF THE ALTAI-SAYAN FOLDED REGION

Marina I. Shaminova¹,
mshaminova@mail.ru

Irina V. Rychkova¹,
irina.rychkova@mail.ru

Kristina N. Saar²,
saar.kris@mail.ru

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

² «Yakutskgeologiya» Aldan OP,
24, Kalvitsyna avenue, Yakutsk, 677009, Russia.

The relevance of the research is caused by insufficient knowledge on the Paleozoic oil and gas deposits of Western Siberia and the Altai-Sayan folded region associated with it, although new oil and gas condensate fields have recently been discovered in this territory. Paleozoic deposits are highly promising objects for discovery of hydrocarbon deposits. The results of paleogeographic and lithological-geochemical studies of the region under study can significantly affect the reconstruction of paleoenvironments favorable for generation and accumulation of hydrocarbons, as well as assessment of the prospects for oil and gas potential of Paleozoic sediments and identification of unconventional reservoirs.

Objects: carbonate deposits of the Zhivetian stage of the Middle Devonian, outcropping in the quarries Kamen and Podlomsk (Tomsk region), Lebedyansky quarry (Kemerovo region), in the areas of Lake Fyrkal and Oshkol, as well as west of the lake Tus (Northern Khakassia).

Purpose: paleogeographic reconstruction of sedimentation environments favorable for oil and gas accumulation, as well as identification and assessment of the prospects for oil and gas potential of Paleozoic sediments in the rocks of the Paleozoic basement.

Methods: lithological-petrographic, paleontological, paleogeographic, litho-geochemical (X-ray spectral, scanning electron microscopy, luminescence microscopic, inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS)).

Results. The authors were the first to establish signs of oil and gas content of the Middle Devonian deposits in the Tomsk region (Kamen and Podlomsky quarries), in the Kemerovo region (Lebedyansky quarry), in Northern Khakassia (areas of Lake Fyrkal and Oshkol, as well as west of Lake Tus). As a result of paleontological and geochemical studies, the features of the paleoenvironment of sedimentation, favorable for accumulation of OM, burial and generation of hydrocarbons, have been revealed. Among the studied sediments, the petrotypes: boundstone, rudstone, floutstone, packstone, wakstone and mudstone, which underwent intensive postsedimentary transformations, significantly influenced their reservoir properties, were identified. Luminescence microscopic studies made it possible to establish the facts of intensive fluid migration in the studied areas and to identify potential reservoirs. It was found that the largest amount of bitumoids is recorded in reef boundstone limestones. This petrotype has a high reservoir potential, because the corals composing it have good qualities for this – cavernousness and biowasiness.

Key words:

Altai-Sayan fold area, Zhivetian deposits, Middle Devonian, bituminous content, petrotypes.

REFERENCES

- Kontorovich V.A., Kalinina L.M., Kalinin A.Yu., Solovyev M.V. Oil and gas targets of the Paleozoic Deposits of Western Siberia, seismogeological models of reference fields. *Geology of Oil and Gas*, 2018, no. 4, pp. 5–15. In Rus.
- Ananyev Yu.S., Vasilev B.D., Gudymovich S.S., Koptev I.I., Makarenko N.A., Parnachev V.P., Parnachev S.V. Tanzybaev M.G., Falk A.Yu. *Geologiya i minerageniya Severnoy Khakassii* [Geology and Minerageny of Northern Khakassia]. Tomsk, TPU Publ., 2007. 236 p.
- Kontorovich V.A., Kalinina L.M. Geological structure and oil and gas content of the Paleozoic of Western Siberia, models of reference fields. *Drilling and oil*, 2019, no. 11, pp. 18–25. In Rus.
- Lobova G.A., Luneva T.E., Isaeva O.S. Oil and gas content of the weathering crust and Paleozoic of the Koltogorsk mesotrough (north-west of the Tomsk region). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 9, pp. 103–113. In Rus.
- Embrym A.F., Klován J.E.A late devonian reef tract on north heastehn Bancks Island Northwest Territories. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, 1971, vol. 19, no. 4, pp. 730–781.
- Longman M.W. Carbonate diagenetic textures from nearshore diagenetic environments. *AAPG. Bulletin*, 1980, vol. 64, no. 4, pp. 461–487.
- Rzhonsnitskaya M.A. *Polevoy atlas kharakternykh kompleksov fauny i flory devonskikh otlozheniy Minusinskoy kotloviny* [Field atlas of characteristic assemblages of fauna and flora of the Devonian deposits of the Minusinsk depression]. Moscow, Gosgeoltekhizdat Publ., 1955.140 p.
- Wilson J.L. *Karbonatnye fatsii v geologicheskoy istorii* [Carbonate facies in geological history]. Moscow, Nedra Publ., 1980. 463 p.
- Danham R.J., Ham W.E. Classification of carbonate rocks according to depositional texture Classification of carbonate rocks. *Symposium American Association of Petroleum Geologists*, 1962, vol. 1, pp. 108–121.
- Kuramshin R.M., Chernitskiy A.V., Gula E.V. Differential estimation of oil reserves based on carbonate reservoir classification (Russian). *Neftaynoe khozaystvo*, 2019, no. 5, pp. 48–50. In Rus.
- Yudovich Ya.E. *Problema geokhimicheskoy diagnostiki fatsi i sedimentogeneza* [The problem of geochemical diagnostics of the sedimentogenesis facies]. Tomsk, TSU Publ., 2007. 188 p.
- Scholle P.A., Ulmer-Scholle D.S. Color guide to the petrography of carbonate rocks: grains, textures, porosity, diagenesis. *AAPG. Memour 77*, Tulsa, 2003. 474 p.

13. Kuzmin V.A. Digital formalization of microstructural parameters of carbonate reservoirs based on Fourier analysis. *Actual problems of oil and gas*, 2018, vol. 1 (20), pp. 1–15. In Rus.
14. Reed S.G.B. *Elektronno-zondovy mikroanaliz i rastrovaya elektronnaya mikroskopiya v geologii* [Electron probe microanalysis and scanning electron microscopy in geology]. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2008. 232 p.
15. Haskin M.A., Haskin L.A. Rare earths in European shales: a re-determination. *Science*, 1966, vol. 154, pp. 507–509.
16. Murray P.W., Buchholtzen M.R. Rare earth elements in Japan Sea sediments and diagenetic behaviour of Ce/Ce*: results. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1991, vol. 55, pp. 2453–2466.
17. Bjorlikke K. *Sedimentology and petroleum geology*. Berlin, Springer, 1989. 363 p.
18. Tucker M.E., Wright V.P., Dickson J.A. *Carbonate sedimentology*. Oxford, Blackwell, 1990. 482 p.
19. Immenhauser A. Towards a definition of the deep burial realm in carbonate diagenesis. *34th International Meeting of Sedimentologists*. Rome, 2019. p. 1170.
20. Bagmanova S.V., Pankratiev P.V., Synkova I.V., Stepanov A.S., Kolomoets A.V. Domanic type deposits – target object of prospecting works (Russian). *Neftaynoe khozaystvo*, 2018, no. 12, pp. 92–96. In Rus.
21. Shaminova M.I., Potseluev A.A., Rychkova I.V., Korchuganov Ya.Yu. New data on specific conditions of formation of tournaian deposits of Kolyvan–Tomsk folded zone. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2016, vol. 327, no. 3, pp. 16–22. In Rus.

Received: 23 June 2021.

Information about the authors

Marina I. Shaminova, Cand Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Irina V. Rychkova, Cand Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Kristina N. Saar, 1 category geologist, AO «Yakutskgeologiya» Aldan OP.

УДК 553.04:666.9-127

ПРИМЕНЕНИЕ ЦЕОЛИТОВ ЯКУТИИ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ГРАНУЛИРОВАННОГО ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННОГО МАТЕРИАЛА

Иванов Константин Сергеевич,
sillicium@bk.ru

Институт криосферы Земли Тюменского научного центра СО РАН,
Россия, 625000, г. Тюмень, ул. Малыгина, 86.

Актуальность исследования связана с вовлечением цеолитовой породы месторождения Хонгуруу (Якутия) в производство теплоизоляционного материала, благодаря чему решается проблема обеспечения региональной строительной отрасли крупнотоннажным сырьевым ресурсом.

Цель: исследование возможности применения местного сырьевого ресурса Якутии для производства гранулированной пеностеклокерамики и исследование её свойств.

Объекты: пробы цеолитовой породы месторождения Хонгуруу, лабораторные образцы гранулированной пеностеклокерамики.

Методы. Химико-минералогический состав цеолитовой породы исследовался с помощью энергодисперсионного рентгенофлуоресцентного спектрометра BrukerS2 Ranger (Германия) и дифрактометра ДРОН-6 (Россия). В исследованиях применялась макросъёмка цифровой фотокамерой. Основные свойства образцов исследованы в соответствии со стандартными методиками: ГОСТ 9758-2012 и ГОСТ 7076-99.

Результаты. Основными породообразующими минералами исследованной породы являются цеолиты типа клиноптилолита и гейландита, что предопределяет её высокую реакционную способность к взаимодействию со щелочами. Применение экструзионного метода синтеза пеностеклокерамики способствует интенсификации реакции образования гидратированных щелочных силикатов и снижению расхода гидроксида натрия в 1,8 раза. Из цеолитовой породы получены образцы гранулированного теплоизоляционного материала фракции 10–20 мм. Насыпная плотность составляет 220 кг/м³, прочность при сжатии в цилиндре – 1,5 МПа, эффективная теплопроводность слоя материала – 0,078 Вт/(м·°С) и объёмное водопоглощение – 6,2 %. Нормативные требования допускают применение полученного материала для строительства дорог в сложных геокриологических условиях Якутии. Предложенный метод синтеза является перспективным с точки зрения обеспечения строительства транспортных магистралей гранулированным теплоизоляционным материалом из местных цеолитовых пород. Учитывая колоссальную протяжённость территории Якутии, наибольший экономический эффект при строительстве дорог может быть достигнут путём создания мобильных комплексов по производству теплоизоляционного материала вблизи объектов строительства.

Ключевые слова:

Природный цеолит, клиноптилолит, теплоизоляционный материал, пеностеклокерамика, дорожное строительство.

Введение

Промышленное освоение Арктической зоны России, учитывая её колоссальную протяжённость, немислимо без создания новой и совершенствования существующей транспортной инфраструктуры. В этой связи развитие и локализация производств инновационных строительных материалов, ориентированных на региональную сырьевую базу, является актуальной задачей [1].

На сегодняшний день в мировой и отечественной практике при строительстве автомобильных и железных дорог в условиях распространения вечной мерзлоты широко применяются плиты из экструзионного пенополистирола [2, 3]. Благодаря низкой теплопроводности, порядка 0,035 Вт/(м·К), применение теплоизоляционных слоёв из этих плит способствует сохранению грунтов оснований в мёрзлом состоянии. Однако низкая средняя плотность плит (35–40 кг/м³) и дальность их транспортировки, которая может превышать 2 тыс. км, приводит к высоким логистическим издержкам и кратному увеличению стоимости материала на месте строительства. В связи с климатическими и экономико-географическими особенностями создание региональных производств теплоизоляционных материалов является актуальной задачей.

Арктическая зона России обладает сырьевым потенциалом для получения экологически чистых и высококачественных теплоизоляционных материалов. Например, одна из наиболее перспективных в плане обеспечения портов Северного морского пути стабильным грузопотоком Ямало-Ненецкая опорная зона освоения Арктики обладает крупнейшими в стране запасами опал-кристаллитовых пород с ресурсным потенциалом свыше 300 трлн м³ [4]. Согласно публикациям последних лет, эти породы являются перспективным сырьём для получения пеностеклокерамики. Этот теплоизоляционный материал обладает необходимой прочностью для его укладки в основания сооружений. Но самое главное – благодаря закрытопористой структуре материал имеет низкое водопоглощение и сохраняет свои теплоизоляционные свойства в увлажнённом состоянии [5–7].

Другой важнейшей территорией освоения Арктики является Северо-Якутская опорная зона Республики Саха, где находится одна из ключевых точек Северного морского пути – порт Тикси [1]. Промышленное освоение этой территории потребует модернизации существующей и создания современной транспортной системы. Учитывая протяжённость Якутии, для строительства автомобильных и железнодорожных транспортных магистралей потребуются сотни

тысяч кубических метров теплоизоляционных материалов.

В этой связи наиболее перспективным местным сырьевым ресурсом для их производства могут стать цеолитовые породы. Прогнозные ресурсы Кемпедийского цеолитоносного района западной Якутии насчитывают около 3,5 млрд т [8]. Например, утверждённые и пригодные для открытой разработки запасы одного из месторождений цеолитоносного района – Хонгуруу, насчитывают 11 млн т. Отечественная и зарубежная литература последних лет свидетельствует о возможности получения на основе цеолитовых пород широкой номенклатуры строительных материалов [9–17].

Особую значимость, как было сказано выше, имеют современные методы синтеза теплоизоляционной пеностеклокерамики из цеолитов [10, 11]. Однако анализ литературных источников не позволяет сделать заключение о полной исчерпанности проблемы производства пеностеклокерамики из местных цеолитовых пород. Отметим основные аргументы в этой связи:

1. Существует необходимость целевого исследования и обоснования пригодности образцов цеолитовых пород западной Якутии для получения теплоизоляционного материала.
2. Свойства материала должны соответствовать как суровым климатическим условиям Якутии, так и особенностям технологии его применения при возведении автомобильных и железных дорог. Таким образом, возрастают требования к прочности, водопоглощению и теплопроводности материала.
3. В связи с необходимостью применения для синтеза материала такого дорогостоящего компонента как гидроксид натрия (каустик), требуются технологические приёмы, позволяющие снизить его содержание в сырьевой смеси до 10 % и менее.
4. Несмотря на множество различных способов синтеза, изложенных в научной литературе, на сегодняшний день отсутствует единая технология производства пеностеклокерамики, позволяющая масштабировать промышленное производство. Приоритетным в этом плане может стать создание мобильных производственных установок для непрерывного обеспечения материалом протяжённых участков строительства транспортных магистралей.

В настоящее время основной предпосылкой для успешного решения рассматриваемой проблемы является разработанный в ИКЗ ТюмНЦ СО РАН (г. Тюмень, Россия) экструзионный метод синтеза гранулированной пеностеклокерамики. Основой метода является процесс непрерывного приготовления, перемешивания и грануляции сырьевой смеси путём её продавливания шнеком сквозь калиброванные отверстия гранулирующей решётки. Среди существующих методов экструзионный метод наиболее прост с точки зрения практической реализации, а также более эффективен экономически, т. к. позволяет существенно сократить содержание гидроксида натрия в сырьевой смеси.

На основе экструзионного метода разработана технология гранулированной пеностеклокерамики с применением диатомитов и диатомовых глин Новоуренгойской площади [18–20]. Результатом промышленной апробации новой технологии с применением сырья месторождений, имеющих участки выхода пород вблизи транспортных магистралей, послужило строительство опытно-экспериментальных участков автомобильных дорог. Благодаря накопленному положительному опыту экспериментального применения материала, в 2017 г. был разработан нормативный документ, регламентирующий его применение в дорожном строительстве на вечномёрзлых грунтах [21].

В отличие от плит из экструзионного пенополистирола, гранулированная пеностеклокерамика обладает дренажными функциями, сохраняя при том свои теплоизоляционные свойства. В этой связи полученный материал был применён для теплоизоляции водоотводных железобетонных конструкций на участке пути Забайкальской железной дороги (район станции Ерофей Павлович) [22]. Благодаря этому было исключено замерзание дренажных вод и обеспечено бесперебойное функционирование водоотводных сооружений пути.

Учитывая накопленный научно-производственный опыт получения и практический опыт применения гранулированной пеностеклокерамики, экструзионный метод можно считать одним из наиболее перспективных направлений промышленной переработки цеолитовых пород Якутии. В этой связи цель работы состояла в исследовании особенностей синтеза гранулированной пеностеклокерамики из цеолитовых пород Якутии экструзионным методом, а также в обосновании применения материала в дорожном строительстве.

Методика исследования

Пробы цеолитовой породы были отобраны с действующего карьера месторождения Хонгуруу, расположенного в 22 км к югу от пос. Кемпедий Сунтарского улуса. В настоящее время на месторождении различают цеолитовые породы клиноптилолит-гейландитового и гейландитового составов с различным содержанием катионов Ca, Na и K [8]. На большей части месторождения распространён первый тип сырья.

Химический состав породы был исследован с помощью энергодисперсионного рентгенофлуоресцентного спектрометра BrukerS2 Ranger (Германия). Минералогический состав проб исследовался с применением дифрактометра ДРОН-6 (Россия).

В общем случае суть синтеза пеностеклокерамики сводится к смешиванию измельчённых в порошок кремнезёмсодержащих пород с раствором щёлочи, с образованием гидратированных щелочных силикатов на первом этапе. На втором этапе происходит вспенивание смеси при температуре 750–900 °С в результате образования расплава и дегидратации новообразований – силикатов. Полученная силикатная «пена» содержит стекловидную и кристаллическую фазу минеральной части кремнезёмсодержащей породы, которая не вступает в реакцию со щёлочью.

Для получения образцов пеностеклокерамики цеолитовая порода высушивалась и измельчалась в дробилке до размера не более 5 мм. Затем с помощью вибрационной мельницы из породы приготавливали порошок с размером частиц не более 0,16 мм. Молотая порода смешивалась с раствором гидроксида натрия (NaOH) с концентрацией 40 %. Полученная смесь содержала 10 % NaOH в пересчёте на сухое вещество. При более низком содержании щелочного компонента теплоизоляционные свойства пеностеклокерамики ухудшаются за счёт низкой вспениваемости смеси. Увеличение содержания щелочного компонента приводит к удорожанию материала.

Смесь в виде пресс-порошка за счёт продавливания шнеком сквозь отверстия гранулирующей решётки превращалась в тугопластичную гранулированную массу. Для этой цели применялся экструдер, схематичный вид которого и фотография общего вида представлены на рис. 1.

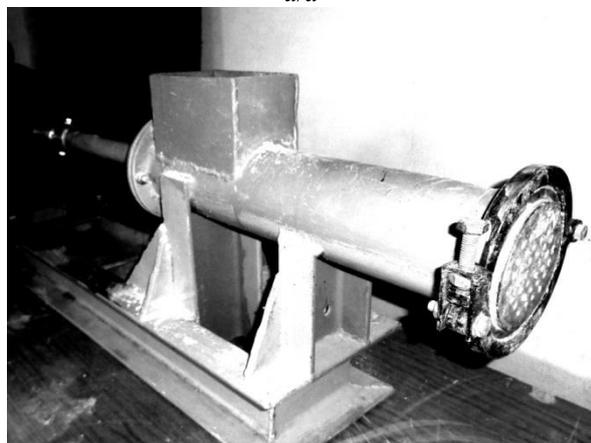
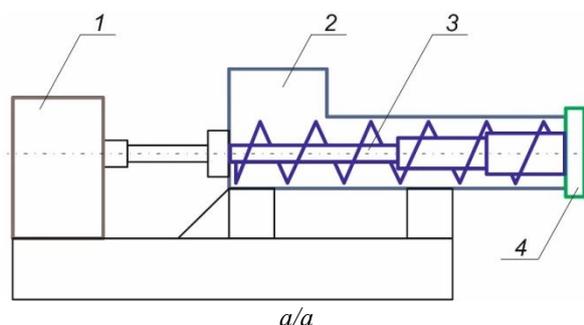


Рис. 1. Лабораторный экструдер в разрезе (а) и общий вид (б): 1 – механизм электропривода; 2 – загрузочное отверстие; 3 – шнек; 4 – гранулирующая решётка

Fig. 1. Cross sectional (a) general view (b) of laboratory extruder: 1 – electric drive mechanism; 2 – loading pit; 3 – auger; 4 – granulating mesh

Шнек имел диаметр, равный шагу его витка, который составлял 80 мм. Необходимое для продавливания смеси усилие обеспечивалось электроприводом с крутящим моментом 490 Н·м, развиваемым при частоте вращения шнека 45 мин⁻¹. Механизованная обработка смеси в экструдере сочетает в себе несколько процессов:

- 1) дополнительная гомогенизация смеси;
- 2) интенсификация химического процесса образования силикатов;
- 3) грануляция смеси с получением полуфабриката диаметром 5 мм и длиной 5–12 мм (размеры зависят от диаметра отверстий в гранулирующей решётке).

Результаты и обсуждение

Химический состав проб, отобранных с поверхности карьера, имел следующие усреднённые значения, мас. %: SiO₂ – 66,2, Al₂O₃ – 13,1, Fe₂O₃ – 1,0, MgO – 0,8, CaO – 1,4, Na₂O – 3,6, K₂O – 1,2, TiO₂ – 0,2, потери при прокаливании – 12,5. Внешний вид цеолитовой породы показан на рис. 2.



Рис. 2. Цеолитовая порода месторождения Хонгуру (масштаб клетки 1 см)

Fig. 2. Zeolite-bearing rock of the Khonguru deposit (scale of a square is 1 cm)

Полуфабрикат высушивался при 80 °С, после чего для дальнейшего обжига гранулы помещались на керамическую подложку в один слой.

Обжиг гранул проводился в муфельной печи при 800 °С в течение 20 мин. Основные качественные характеристики образцов гранулированной пеностеклокерамики: насыпная плотность, прочность при сжатии в цилиндре, водопоглощение и теплопроводность определялись в соответствии со стандартными методами [23, 24].

Дифрактограмма цеолитовой породы представлена на рис. 3. Основной минеральной составляющей цеолитовой породы являются клиноптилолит и гейландит, которые имеют схожие рефлексы в диапазоне углов 9–30°. Остальные фазы с содержанием не более 20 % были идентифицированы как кварц, полевошпатовый минерал альбит и иллит (гидрослюда). По химико-минералогическому составу исследованные пробы относятся к клиноптилолит-гейландитовому типу сырья, получившему название хонгурин [8].

Высокое содержание кремнезёма (66,2 %) и цеолитов (около 80 %) характеризует породу как потенциально пригодную для синтеза пеностеклокерамики в силу пористого строения и высокой реакционной способности цеолитов. Как отмечалось выше, процесс

а также характерный стеклянный блеск, соответствующий высокому содержанию стеклофазы. Зеленоватая окраска, местами переходящая в чёрную, объясняется оплавлением наружной поверхности гранул при обжиге, что способствует созданию восстановительной среды внутри гранулы. В результате восстановления Fe_2O_3 образуются закисные формы железа, дающие окраску.

Благодаря преимущественно закрытопористой стекловидной структуре гранулы обладают сравнительно низким водопоглощением по объёму, которое составляет 6,2 %. Например, для керамзитового гравия это значение превышает 20 %. Высокое водопоглощение материала существенно снижает его теплоизоляционные функции, приводя к резкому увеличению эффективной теплопроводности. В этой связи строительство дорог в сложных геокриологических условиях требует применения теплоизоляционных материалов с минимальным водопоглощением.

Полученные результаты можно сравнить с данными других авторов [10, 11], синтезировавших из цеолитовых пород гранулированную пеностеклокерамику с насыпной плотностью 125 кг/м^3 и теплопроводностью $0,045 \text{ Вт/(м}\cdot^\circ\text{C)}$. В настоящих исследованиях получены более высокие экспериментальные значения насыпной плотности и теплопроводности: 220 кг/м^3 и $0,078 \text{ Вт/(м}\cdot^\circ\text{C)}$ соответственно.

Однако необходимо отметить, что синтез пеностеклокерамики из цеолитовой породы с применением экструзионного метода имеет следующие преимущества:

1. Механизированное воздействие шнека на сырьевую смесь способствует интенсификации образования гидратированных щелочных силикатов, что позволяет снизить содержание $NaOH$ в 1,8 раза и существенно удешевить материал.
2. Процессы смешивания, силикатообразования и грануляции сырьевой смеси совмещаются в одной операции, что упрощает технологию.
3. В отличие от результатов других авторов, гранулированная пеностеклокерамика из цеолитовой породы месторождения Хонгуруу имеет прочность при сжатии в цилиндре 1,5 МПа и объёмное водопоглощение 6,2 %, благодаря чему, согласно

нормативным требованиям [21], допускается применение полученного теплоизоляционного материала в дорожном строительстве.

Выводы

1. Химико-минералогический состав цеолитовой породы месторождения Хонгуруу в основном представлен кремнезёмом и цеолитами типа клиноптилолита и гейландита, что свидетельствует о высокой реакционной способности породы к образованию гидратированных щелочных силикатов при взаимодействии со щёлочью.
2. Нормативные требования допускают применение полученного гранулированного теплоизоляционного материала, имеющего прочность при 1,5 МПа, эффективную теплопроводность $0,078 \text{ Вт/(м}\cdot^\circ\text{C)}$ и объёмное водопоглощение 6,2 % для строительства дорог в сложных геокриологических условиях Якутии.
3. По сравнению с существующими методами синтеза пеностеклокерамики, применение экструзионного метода позволило снизить содержание $NaOH$ в исходной смеси в 1,8 раза, что даёт существенный экономический эффект.
4. Предлагаемый простой и экономичный экструзионный метод является базой для создания мобильных производственных комплексов, позволяющих непрерывно обеспечивать строящиеся дороги Якутии востребованным теплоизоляционным материалом, что существенно сократит транспортные издержки. Технология переработки цеолитовых пород с применением серийно выпускаемого оборудования включает дробление, сушку, помол сырья, двухстадийную грануляцию в шнековом экструдере, сушку полуфабриката с последующим вспениванием в барабанной печи обжига. В зависимости от условий производства разработаны сушильные и печные агрегаты, работающие на различном топливе: уголь, мазут, газоконденсатное и дизельное топливо.

Работа выполнена в рамках темы госзадания: рег. № НИОКТР АААА-А17-117051850061-9. Исследования частично финансировались АНО «Губернская Академия», г. Тюмень.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Смирнова О.О., Липина С.А., Кудряшева Е.В. Формирование опорных зон в Арктике: методология и практика // Арктика и Север. – 2016. – № 25. – С. 148–157.
2. Thermal regime analysis and protective measure evaluation for wide embankment in permafrost regions of Qinghai-Tibet Plateau / T. Ma, T. Tang, X. Ding, X. Huang, Y. Zhao // International Journal of Civil Engineering. – 2018. – V. 16 (10). – P. 1303–1316.
3. Esch D.C. Long-term evaluations of insulated roads and airfields in Alaska // Transportation Research Record. – 1995. – V. 1481. – P. 56–62.
4. Нестеров И.И., Генералов П.П., Подсосова Л.Л. Западно-Сибирская провинция кремнисто-опаловых пород // Советская геология. – 1984. – № 3. – С. 3–10.
5. Peculiarities of foam glass synthesis from natural silica-containing raw materials / E.A. Yatsenko, B.M. Goltsman, L.V. Klimova, L.A. Yatsenko // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. – 2020. – V. 142. – P. 119–127.
6. Goltsman B.M., Yatsenko L.A., Goltsman N.S. Production of foam glass materials from silicate raw materials by hydrate mechanism // Solid State Phenomena. – 2020. – V. 299. – P. 293–298.
7. Biostable silicic rock-based glass ceramic foams / V.T. Erofeev, A.I. Rodin, A.S. Kravchuk, S.V. Kaznacheev, E.A. Zaharova // Magazine of Civil Engineering. – 2018. – V. 84 (8). – P. 48–56.
8. Колодезников К.Е. Цеолитосные провинции востока Сибирской платформы. – Новосибирск: Наука, 2003. – 204 с.
9. Овчаренко Г.И. Цеолиты в строительных материалах. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2000. – 320 с.
10. Kazantseva L.K., Rashchenko S.V. Optimization of porous heat-insulating ceramics manufacturing from zeolitic rocks // Ceramics International. – 2016. – V. 42 (16). – P. 19250–19256.
11. Kazantseva L.K., Rashchenko S.V. Chemical processes during energy-saving preparation of lightweight ceramics // Journal of the American Ceramic Society. – 2014. – V. 97 (6). – P. 1743–1749.
12. Foam glass using sodium hydroxide as foaming agent: Study on the reaction mechanism in soda-lime glass matrix / R.C. Da Silva, E.T. Kubaski, E.T. Tenório-Neto, M.K. Lima-Tenório,

- S.M. Tebcherani // Journal of Non-Crystalline Solids. – 2019. – V. 511. – P. 177–182.
13. Zeolitic tuffs as raw materials for lightweight aggregates / R. De’Gennaro, P. Cappelletti, G. Cerri, M. De’Gennaro, M. Dondi, A. Langella // Applied Clay Science. – 2004. – V. 25 (1–2). – P. 71–81.
 14. Use of zeolite-rich rocks and waste materials for the production of structural lightweight concretes / R. De’Gennaro, A. Langella, M. D’Amore, M. Dondi, A. Colella, P. Cappelletti, M. De’Gennaro // Applied Clay Science. – 2008. – V. 41 (1–2). – P. 61–72.
 15. Colella C., De’Gennaro M., Aiello R. Use of zeolitic tuff in the building industry // Reviews in Mineralogy and Geochemistry. – 2001. – V. 45. – P. 551–587.
 16. Properties of lightweight concrete blocks with waste zeolitic tuff / I. Tekin, T. Kotan, A.T. Osmanson, W. Brostow, O. Gencel // Medziagotyra. – 2020. – V. 26 (4). – P. 463–470.
 17. Volland S., Brötz J. Lightweight aggregates produced from sand sludge and zeolitic rocks // Construction and Building Materials. – 2015. – V. 85. – P. 22–29.
 18. Диатомиты Ямала в технологии строительных материалов для Арктических условий / К.С. Иванов, А.А. Мельникова, Е.А. Коротков, П.В. Смирнов // Промышленное и гражданское строительство. – 2016. – № 1. – С. 18–23.
 19. Смирнов П.В., Иванов К.С. Ресурсный потенциал р. Томчару-Яха на диатомитовое сырьё // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. – 2015. – № 2. – С. 97–103.
 20. Ivanov K.S. Influence of the methods of preparing a silicate-sodium mixture on the formation of the structure of foam glass ceramics // Glass Physics and Chemistry. – 2019. – V. 45 (1). – P. 60–65.
 21. СП 313.1325800.2017. Дороги автомобильные в районах вечной мерзлоты. Правила проектирования и строительства. – М.: Стандартинформ, 2018. – 74 с.
 22. Утепление железобетонных конструкций для пропуска дренажных вод на Забайкальской дороге / В.П. Мельников, Е.А. Коротков, К.С. Иванов, Е.В. Шехтман, З.Б. Дашинамаев, Н.П. Сигачев, Я.М. Клочков // Путь и путевое хозяйство. – 2017. – № 7. – С. 13–15.
 23. ГОСТ 9758-2012. Заполнители пористые неорганические для строительных работ. Методы испытаний. – М.: Стандартинформ, 2014. – 84 с.
 24. ГОСТ 7076-99. Материалы и изделия строительные. Метод определения теплопроводности и термического сопротивления при стационарном тепловом режиме. – М.: Стандартинформ, 2000. – 24 с.

Поступила 15.07.2021 г.

Информация об авторах

Иванов К.С., кандидат технических наук, старший научный сотрудник Института криосферы Земли Тюменского научного центра СО РАН.

UDC 553.04: 666.9-127

APPLICATION OF ZEOLITES OF YAKUTIA FOR OBTAINING GRANULAR THERMAL INSULATION MATERIAL

Konstantin S. Ivanov,
sillicium@bk.ru

Institute of the Earth's Cryosphere of Tyumen Scientific Center, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,
86, Malygin avenue, Tyumen, 625000, Russia.

The relevance of the study is related to the involvement of the zeolite-bearing rock of the Khonguruu deposit (Yakutia) into production of heat insulation material, which solves the problem of providing the regional construction industry with a large-tonnage raw material resource.

The main goal of the research is to study the possibility of using the local raw material base of Yakutia for production of granular glass-ceramic foam and to study its properties.

Objects: zeolite rock samples from the Honguruu deposit, laboratory samples of granular foam-glass ceramic.

Methods. Chemical and mineralogical composition of the zeolite-bearing rock was investigated using an energy-dispersive X-ray fluorescence spectrometer Bruker S2 Ranger (Germany) and a DRON-6 diffractometer (Russia). The research used macro photography with a digital camera. The main properties of the samples were investigated in accordance with the methods of State Standards: 9758-2012 and 7076-99.

Results. The main rock-forming minerals of the studied rock are zeolites such as clinoptilolite and heulandite, which predetermines its high reactivity to interaction with alkalis. The intensification of the formation of hydrated alkaline silicates was achieved due to the use of the extrusion method for synthesis of foam-glass ceramic and consumption of sodium hydroxide was reduced by 1,8 times. Samples of granulated foam-glass ceramic of 10–20 mm fraction with a bulk density of 220 kg/m³, compressive strength in a cylinder of 1,5 MPa, effective thermal conductivity of 0,078 W/(m·°C) and volumetric water absorption of 6,2 % were obtained. The use of the obtained material for road construction in difficult geocryological conditions of Yakutia is allowed by regulatory requirements. The proposed synthesis method is promising from the point of view of ensuring the construction of transport routes with granular heat insulation material from local zeolite-bearing rocks. Taking into account the colossal length of the territory of Yakutia, a significant economic effect in road construction can be achieved through the creation of mobile complexes for production of heat insulation material near construction sites.

Key words:

Natural zeolite, clinoptilolite, insulating materials, glass ceramics, road construction.

The research was carried out within the subject of State Task no NIOKTR AAAA-A17-117051850061-9 and partially financially supported by the ANO «Gubernskaya Akademiya», Tyumen.

REFERENCES

- Smirnova O.O., Lipina S.A., Kudryasheva E.V. Formirovanie opornykh zon v Arktike: metodologiya i praktika [Formation of support zones in the Arctic: methodology and practice]. *Arktika i Sever*, 2016, no. 25, pp. 148–157.
- Ma T., Tang T., Ding X., Huang X., Zhao Y. Thermal regime analysis and protective measure evaluation for wide embankment in permafrost regions of Qinghai-Tibet Plateau. *International Journal of Civil Engineering*, 2018, vol. 16 (10), pp. 1303–1316.
- Esch D.C. Long-term evaluations of insulated roads and airfields in Alaska. *Transportation Research Record*, 1995, vol. 1481, pp. 56–62.
- Nesterov I.I., Generalov P.P., Podsova L.L. *Zapadno-Sibirskaya provintsia kremnistykh opalovykh porod* [West Siberian province of silica-opal rocks]. *Sovetskaya geologiya*, 1984, no. 3, pp. 3–10.
- Yatsenko E.A., Goltsman B.M., Klimova L.V., Yatsenko L.A. Peculiarities of foam glass synthesis from natural silica-containing raw materials. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2020, vol. 142, pp. 119–127.
- Goltsman B.M., Yatsenko L.A., Goltsman N.S. Production of foam glass materials from silicate raw materials by hydrate mechanism. *Solid State Phenomena*, 2020, vol. 299, pp. 293–298.
- Erofeev V.T., Rodin A.I., Kravchuk A.S., Kaznacheev S.V., Zaharova E.A. Biostable silicic rock-based glass ceramic foams. *Magazine of Civil Engineering*, 2018, vol. 84 (8), pp. 48–56.
- Kolodeznikov K.E. *Ceolitonosnyye provintsii vostochnykh Sibirskoy platformy* [Zeolite-bearing provinces in the east of the Siberian platform]. Novosibirsk, Nauka Publ., 2003. 204 p.
- Ovcharenko G.I. *Tseliity v stroitelnykh materialakh* [Zeolites in building materials]. Barnaul, AltGTU Publ., 2000. 320 p.
- Kazantseva L.K., Rashchenko S.V. Optimization of porous heat-insulating ceramics manufacturing from zeolitic rocks. *Ceramics International*, 2016, vol. 42 (16), pp. 19250–19256.
- Kazantseva L.K., Rashchenko S.V. Chemical processes during energy-saving preparation of lightweight ceramics. *Journal of the American Ceramic Society*, 2014, vol. 97 (6), pp. 1743–1749.
- Da Silva R.C., Kubaski E.T., Tenório-Neto E.T., Lima-Tenório M.K., Tebcherani S.M. Foam glass using sodium hydroxide as foaming agent: study on the reaction mechanism in soda-lime glass matrix. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2019, vol. 511, pp. 177–182.
- De'Gennaro R., Cappelletti P., Cerri G., De'Gennaro M., Dondi M., Langella A. Zeolitic tuffs as raw materials for lightweight aggregates. *Applied Clay Science*, 2004, vol. 25 (1–2), pp. 71–81.
- De Gennaro R., Langella A., D'Amore M., Dondi M., Colella A., Cappelletti P., De'Gennaro M. Use of zeolite-rich rocks and waste materials for the production of structural lightweight concretes. *Applied Clay Science*, 2008, vol. 41 (1–2), pp. 61–72.
- Colella C., De Gennaro M., Aiello R. Use of zeolitic tuff in the building industry. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 2001, vol. 45, pp. 551–587.
- Tekin I., Kotan T., Osmanson A.T., Brostow W., Gencel O., Martinez-Barrera G. Properties of lightweight concrete blocks with waste zeolitic tuff. *Medziagotyra*, 2020, vol. 26 (4), pp. 463–470.
- Volland S., Brötz J. Lightweight aggregates produced from sand sludge and zeolitic rocks. *Construction and Building Materials*, 2015, vol. 85, pp. 22–29.
- Ivanov K.S., Melnikova A.A., Korotkov E.A., Smirnov P.V. [Yamal diatomites in building materials technology for Arctic conditions]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitelstvo*, 2016, no. 1, pp. 18–23. In Rus.

19. Smirnov P.V., Ivanov K.S. [Resource potential r. Tomcharu-Yaha for diatomite raw materials]. *Geologiya i mineralno-syrevye resursy Sibiri*, 2015, no. 2, pp. 97–103. In Rus.
20. Ivanov K.S. Influence of the methods of preparing a silicate-sodium mixture on the formation of the structure of foam glass ceramics. *Glass Physics and Chemistry*, 2019, vol. 45 (1), pp. 60–65.
21. SP 313.1325800.2017. *Dorogi avtomobilnye v rayonakh vechnoy merzloty. Pravila proektirovaniya i stroitelstva* [Set of rules 313.1325800.2017. Automobile roads in permafrost regions. Design and construction rules]. Moscow, Standartinform Publ., 2018. 74 p.
22. Melnikov V.P., Korotkov E.A., Ivanov K.S., Shekhtman E.V., Dashinimaev Z.B., Sigachev N.P., Klochkov Ya.M. *Uteplenie zhelezobetonnykh konstruksiy dlya propuska drenaznykh vod na Zabaykalskoy doroge* [Insulation of reinforced concrete structures for drainage water passage on the Trans-Baikal road]. *Put i putevoe khozyaystvo*, 2017, no. 7, pp. 13–15.
23. GOST 9758–2012. *Zapolniteli poristye neorganicheskie dlya stroitelnykh rabot. Metody ispytaniy* [State Standard 9758-2012. Porous inorganic aggregates for construction work. Test methods]. Moscow, Standartinform Publ., 2014. 84 p.
24. GOST 7076-99. *Materialy i izdeliya stroitelnye. Metod opredeleniya teploprovodnosti i termicheskogo soprotivleniya pri statsionarnom teplovom rezhime* [State Standard 7076-99. Building materials and products. Method for determination of thermal conductivity and thermal resistance under stationary thermal conditions]. Moscow, Standartinform Publ., 2000. 24 p.

Received: 15 July 2021.

Information about the authors

Konstantin S. Ivanov, Cand. Sc., senior researcher, Institute of the Earth's Cryosphere of Tyumen Scientific Center, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences.

УДК 622.1

ИССЛЕДОВАНИЕ ОБРУШЕНИЙ ГРУНТА НАД НЕГЛУБОКОЙ ЗАБРОШЕННОЙ ШАХОЙ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГЕОТЕХНИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ИНДИВИДУАЛЬНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА

Усанов Сергей Валерьевич¹,
usv@igduran.ru

Усанова Анна Витальевна¹,
anne.usanova@gmail.com

¹ Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук,
Россия, 620075, г. Екатеринбург, ул. Мамина-Сибиряка, 58.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью строительства зданий и сооружений над старыми заброшенными шахтами. Строительство связано с опасностью провала земной поверхности и разрушения зданий. Эта проблема имеет широкое распространение во всем мире.

Цель: определить риск застройки небольшого участка земли, который расположен над старой золоторудной шахтой, определить параметры вероятных опасных процессов и спрогнозировать потенциальный ущерб.

Методы: анализ архивных горно-геологических документов заброшенной шахты, реконструкция и двумерное моделирование горных выработок под исследуемой территорией, натурное визуальное обследование поверхности, анализ архивных оптических космических снимков, анализ базы данных обрушений поверхности, геофизические зондирования горного массива с дневной поверхности.

Результаты. С помощью двумерного моделирования установлено, что из двух гранитоидных даек, которые разрабатывались в границах исследования, только одна представляет опасность, так как другая по геологическим условиям основным телом залегает за пределами исследования. Это облегчает условия для строительства. Опасные процессы от штрека и орта дайки, которая падает по участок, могут быть только в самой западной части шириной 5 м. Установлено, что с 1957 г. в этом месте не наблюдалось провалов поверхности, а опасные явления, зарегистрированные в окрестностях, представляют из себя проседание грунта диаметром 1–2 м и глубиной 0,5 м. В юго-западном углу участка над ортом георадаром выявлена зона глубиной 3 м, заполненная крупно- и мелкообломочным материалом, что, вероятнее всего, является следствием от его обрушения. Индикаторы, которые могут быть идентифицированы как пустоты или дезинтегрированный массив, не обнаружены двумя методами.

Выводы. Сделан прогноз параметров вредного влияния старой шахты на устойчивость поверхности. Исследованиями установлено, что на этом участке над заброшенной шахтой можно построить коттедж без риска необратимых повреждений во время эксплуатации. Земля безопасна для строительства и проживания. Определены геометрические параметры и частота проявлений вредного влияния подземной разработки. Предложены геотехнические меры минимизации возможного вредного влияния заброшенной шахты.

Ключевые слова:

Заброшенная шахта, старые выработки, обрушение грунта, просадки, строительство, безопасность, прогноз и оценка, геотехнические меры, условия размещения здания.

Введение

Проблема безопасности зданий над старыми шахтами распространена во всем мире. Например, в Австралии насчитывается более 50000 заброшенных шахт (по состоянию на 2012 г.), в Канаде более 10000 (по состоянию на 2000 г.), а в Южной Африке почти 6000 (по состоянию на 2009 г.) [1, 2]. В центральной Европе в 2005 г. насчитывалось 226 горнодобывающих регионов, в 46 % которых добыча полезных ископаемых полностью прекратилась, т. е. имеют место территории ликвидированных шахт [3]. На территории Великобритании более двух миллионов зданий подвержены воздействию неглубоких угольных шахт [4]. Широко распространены небольшие заброшенные шахты в Конго [5].

Урал более трех веков является рудным и металлургическим регионом России. Исторически так сложилось, что старые и заброшенные шахты находятся в границах многих современных уральских городов (рис. 1). Шахты построены при разработке месторождений черных и цветных металлов, золота, соли и угля [6–10]. При

этом использовались разные технологии горных работ, связанные с историческим периодом разработки (XVII–XX в.) и геологическими особенностями. В результате этого опасные процессы на территориях старых шахт протекают с разными параметрами.

Специфика определения качества использования подработанных территорий заключается еще и в том, что с течением времени скудеет информация о геометрических параметрах подземных выработок, о расположении относительно поверхности и способе их погашения. При этом постоянные медленнопротекающие природные процессы, такие как изменение гидрогеологических условий [11–13], суффозия [14, 15], выветривание горных пород [16], геодинамические колебания [17, 18] и другие изменяют устойчивость поверхности над выработками. В старых зонах обрушения происходит уплотнение грунтов в провале и опасность оседания поверхности снижается, в других местах наоборот – образуются новые провалы.

Многообразие факторов, влияющих на деформирование поверхности старых шахт, обусловило отсутствие унифицированного метода прогноза безопасно-

сти зданий при застройке таких территорий, несмотря на многообразие регламентирующих документов: СП 21.13330.2012, СП 116.13330.2011, СНиП 22-02-2003, СП 248.1325800.2016 и др. Поэтому безопасность застройки земель над старыми шахтами оценивается на основе комплекса разносторонних исследований. Кроме этого, в России не существует общенациональных программ по реабилитации подработанных территорий. Поэтому на каждом выработанном месторождении, где расположены заброшенные шахты, проблемы решаются с привлечением средств собственников земель, застройщиков или муниципалитетов. Одному из таких примеров посвящена эта статья.

На небольшой площади 15 Ар в районе заброшенной шахты необходимо разместить коттедж. Участок расположен на поверхности Березовского золоторудного месторождения, разработка которого ведется подземными работами с 1748 г. [19]. Форма и распо-

ложение земельного участка таковы, что предпочтительное место размещения дома находится в зоне влияния разработки двух даек. Гранитоидные дайки, которые разрабатывались шахтой, в этом месте пересекаются и выходят на поверхность. Горные работы закончились здесь в 1860 г. Данные об обрушениях поверхности, способе и полноте погашения горных выработок отсутствуют. С учетом давности – 170 лет после окончания разработок – вероятность того, что опасные процессы не активизируются при строительстве и эксплуатации коттеджа будет безопасной, выскока, но риск повреждения здания остается навсегда [20, 21]. Запасов золота, подлежащих отработке, под участком нет. Это создает положительную перспективу для строительства. Цель работы – спрогнозировать параметры вредного влияния старых подземных горных работ на земельном участке и выбрать безопасное место для размещения коттеджа.

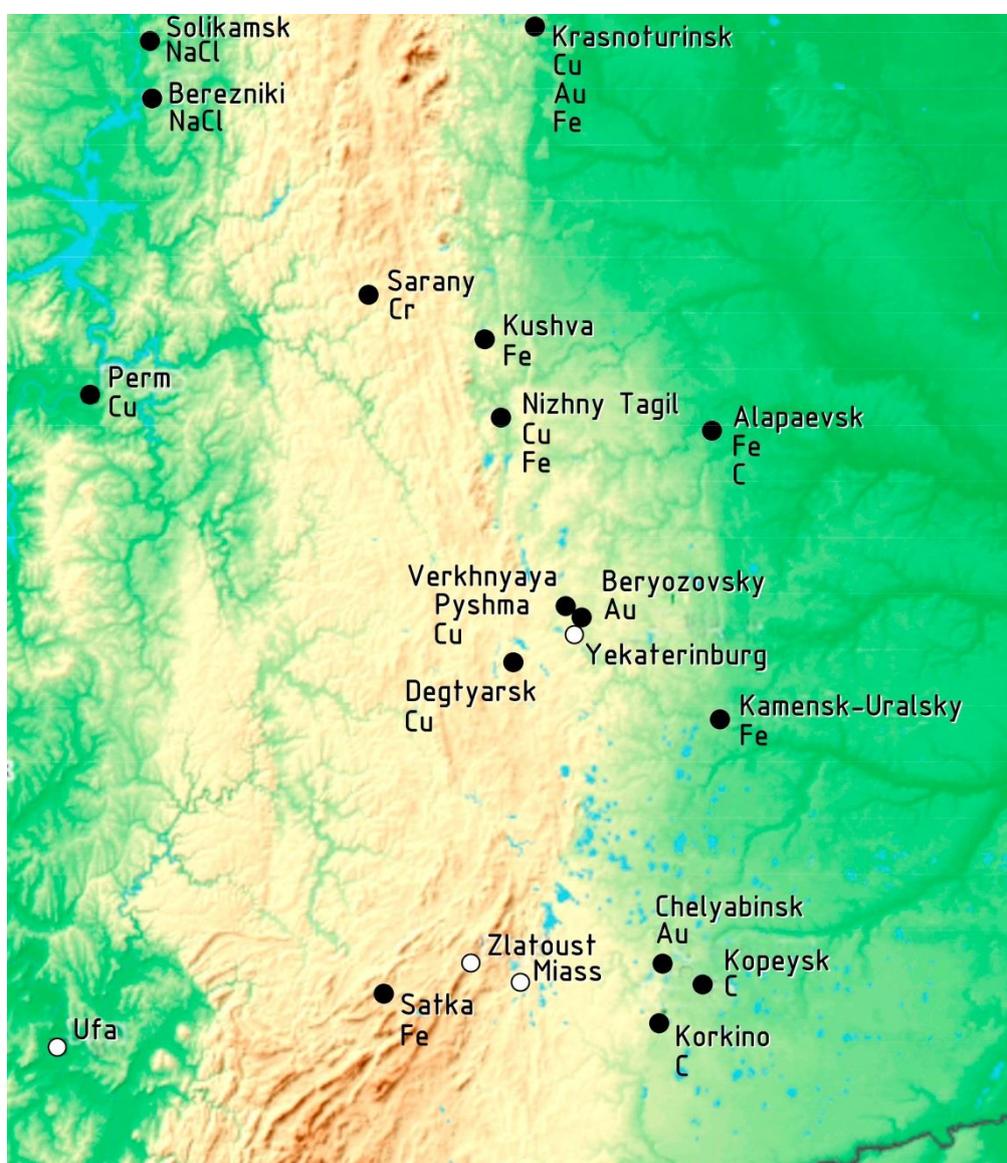


Рис. 1. Города Пермского края, Свердловской и Челябинской областей России, где расположены заброшенные и старые шахты (в качестве базы для создания рисунка использованы данные с сайта [22]).

Fig. 1. Cities of Perm Krai, Sverdlovsk and Chelyabinsk regions of Russia, where abandoned and old mines are located (the data from the website [22] is used as the basis for drawing)

Для того чтобы повысить безопасность застройки и проживания в этом месте надо определить:

- места, где может быть проседание грунта в течение всего срока службы конструкции;
- параметры вероятных опасных процессов;
- потенциальный ущерб;
- геотехнические мероприятия для снижения риска.

Методы и материалы

На исследуемом участке никогда не было инструментального контроля влияния старых горных выработок на деформирование земной поверхности. Доступ в подземные выработки отсутствует. Они ликвидированы, но способ ликвидации и качество погаше-

ния выработанных пространств неизвестны. Это обуславливает необходимость комплексного исследования состояния массива горных пород.

На первом этапе исследований выполнен поиск архивной документации о геологических условиях и горных работах, которые здесь велись. В компании, которая продолжает разрабатывать месторождение, обнаружены материалы о расположении рудных тел, их количестве, горизонтальной мощности, направлении падения и угле залегания (рис. 2). Участок расположен в районе даек Спасская и Кривая. Выходы на поверхность даек залегают на западной границе, которая является приоритетной для размещения сооружений, исходя из пожеланий застройщика.

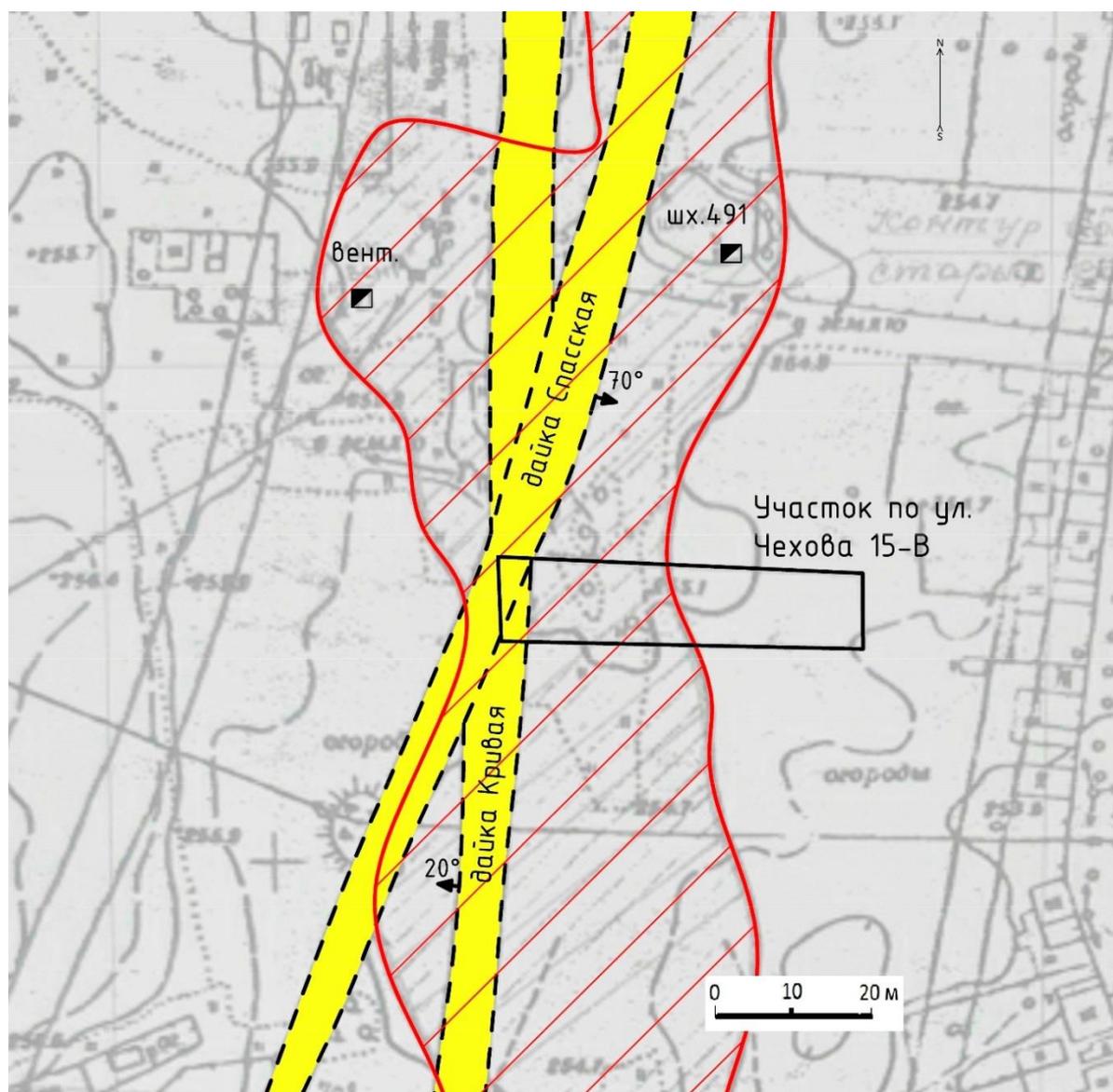


Рис. 2. Расположение земельного участка относительно золоторудных даек и зоны влияния заброшенной шахты
Fig. 2. Location of the land plot relative to the gold dikes and the zone of influence of the abandoned mine

Дайка Кривая имеет пологое западное падение под углом 20° (рис. 2). Горные работы по данным разработчика месторождения по этой дайке не велись. Если по этой дайке были не задокументированные подзем-

ные горные разработки, то с учетом условий ее залегания они должны быть расположены за пределами исследуемой территории. Это еще один положительный фактор в пользу безопасности строительства.

Дайка Спасская также выходит на поверхность в районе западной границы участка, но имеет крутое восточное падение под углом 70° . Обнаруженная в архивах проекция горных работ на вертикальную плоскость (рис. 3) не имеет координатной привязки к плану поверхности (рис. 2), но оба чертежа выполнены в масштабах. Для их совмещения использованы контрольные точки, которые есть на плане и на проекции – устья ликвидированных вертикальных выработок, расположенные к северу от границ исследова-

ния: 1) шахта № 491; 2) шахта вентиляционная. Совместив проекцию горных работ и план поверхности (рис. 3), установлено, что:

- под участком проходит штрек на глубине от поверхности 18 м;
- разработка велась с низкой интенсивностью в период с 1745 по 1860 гг.;
- выработки являются тупиковыми и, скорее всего, носили разведочный характер.

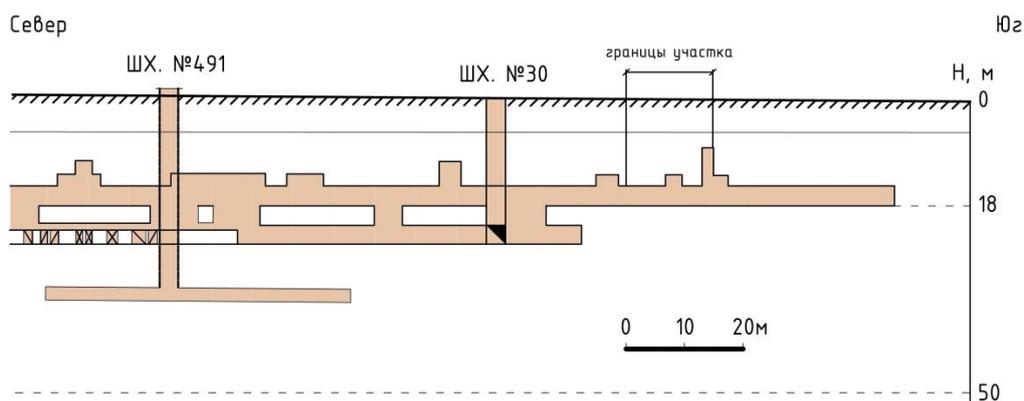


Рис. 3. Фрагмент архивных материалов. Проекция на вертикальную плоскость подземных горных работ вдоль рудного тела Спасская в исследуемом районе

Fig. 3. Fragment of archival materials. Projection on the vertical plane of underground mining operations along the Spasskaya ore body in the study area

Эти данные говорят о слабой нарушенности горного массива. Дополнительно установлена зона вредного влияния горных работ, которая нанесена еще во время разработок и скорректирована позднее с учетом требований нормативного документа по охране зданий и сооружений при разработке Березовского месторождения.

В границах исследования по архивным данным вертикальные горные выработки с выходом на поверхность отсутствуют. Это третий положительный фактор в отношении безопасности строительства. Однако в районе юго-западного угла участка находится слепая вертикальная выработка – восстающий орт высотой 10 м. Если он до сих пор не обрушился, то может представлять опасность для здания.

Для оценки происходивших ранее в этом месте опасных процессов проанализированы журналы регистрации обрушений поверхности. В архивах компании-разработчика месторождения выполнен поиск записей за 1957–2014 гг. Кроме этого, выполнено визуальное обследование поверхности. При натурном обследовании целевыми объектами были следы просядок поверхности, трещины, уступы и другие изменения рельефа. Эти же следы влияния горных работ разыскивались при анализе архивных оптических космических снимков.

Последним этапом был поиск геофизическими методами пустот или разрыхленных горными разработками грунтов. Как правило, в проработанном горном массиве пустоты больших размеров довольно редкое явление. Чаще всего полости от старых шахт находятся в состоянии полного или частичного заполне-

ния и отличаются степенью заполнения и плотностью заполнителя.

Основываясь на созданной модели старой шахты, приняты глубина зондирования, шаг зондирования в профиле и сетка профилей с ячейками 3×3 м, чтобы не пропустить влияния подземных выработок диаметром до 2 м на свойства горных пород. В качестве инструментов использованы метод георадиолокации и спектрального сейсмопрофилирования [23–26]. При исследованиях подземных пустот применяют и другие геофизические методы в зависимости от внешних условий и решаемых задач [27]. Методом георадиолокации зондирование проведено по 14 профилям общей протяженностью 490 м, которые дублируют профили спектрального сейсмопрофилирования. Результаты геофизических исследований сопоставлялись с данными архивных документов и анализировались в комплексе. Это снижает ошибки методов и повышает надежность оценки.

Результаты

На основе архивных данных создана двумерная модель распространения горных выработок под участком (рис. 4). Модель, как результат создания абстрактного представления графических данных для анализа, описания и объяснения условий подработки поверхности горными работами, включает: поверхность, границы индивидуальной застройки, расположение и залегание рудных тел, а также максимальный горизонт горных выработок +18 м. Все данные имеют координатную привязку и выполнены в масштабе. Модель упрощенно воспроизводит залегание даек, так как мало данных

для точного построения, а геологические данные вообще отсутствуют. Тем не менее из результатов моделирования становится очевидно, что:

- горные работы по дайке Кривая не оказывают опасного влияния;
- подземные выработки по дайке Спасская расположены под участком;
- опасные процессы могут быть только в западной части.

Визуальное обследование поверхности показало, что территория выровнена под застройку и любые старые опасные проявления сдвижения горных пород уничтожены. На спланированной поверхности свежие трещины и провалы отсутствуют. По словам местных жителей, рельеф до выравнивания имел в юго-

западной части проседание диаметром 2 м и глубиной 0,5 м. При анализе архивных космических фотоснимков за 2001–2020 гг. изменений поверхности выше разрешающей способности снимков, не установлено. Анализ журналов регистрации провалов на территории Березовского золоторудного месторождения выполнен с помощью базы данных провалов [28]. За 1957–2014 гг. в районе участка не зарегистрировано ни одного случая обрушения поверхности или других опасных явлений. С учетом длительного периода после окончания разработки (более 170 лет), малых объемов выработок, отсутствием на поверхности свежих и старых проседаний процесс сдвижения георетически можно отнести к стадии окончания, что позволяет строительство некоторых зданий.

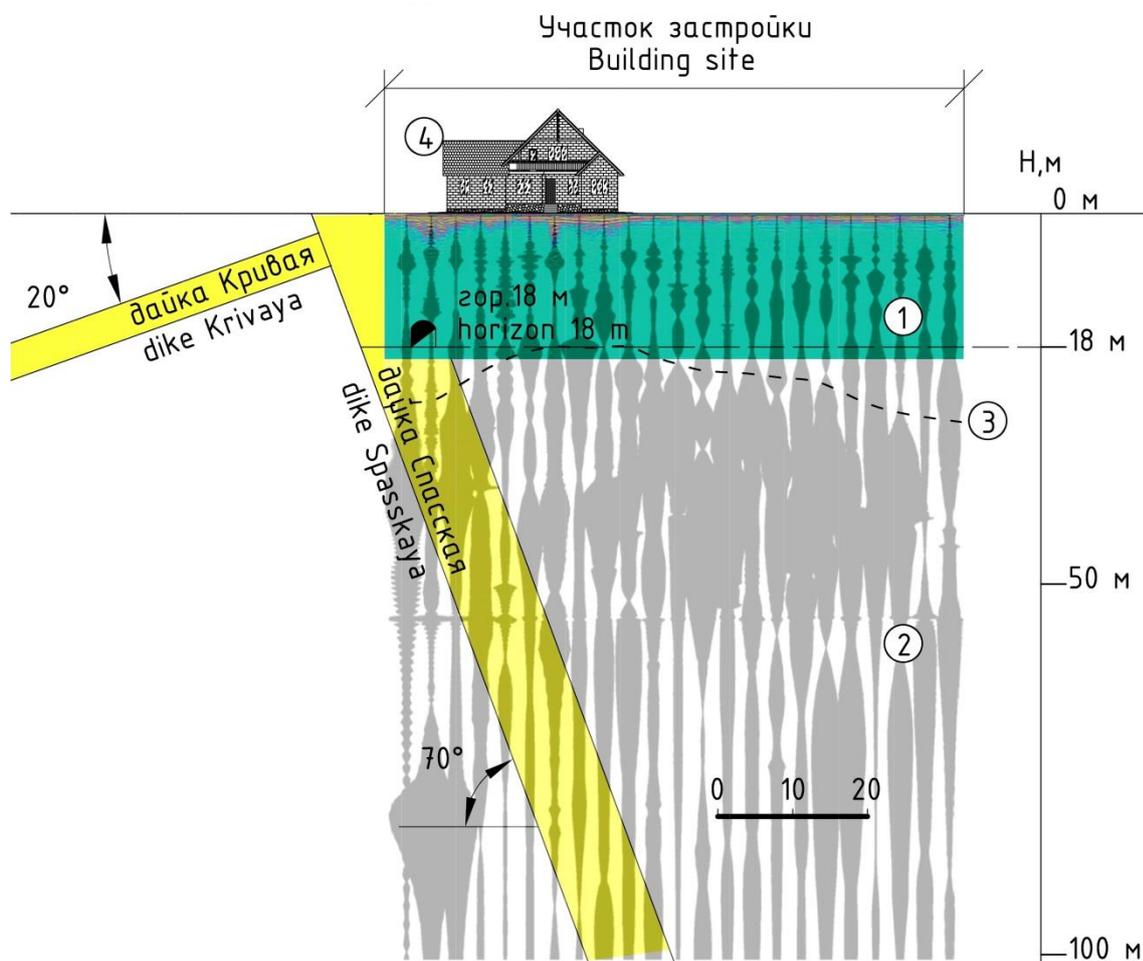


Рис. 4. Двумерная модель залегания подземных горных выработок под участком строительства коттеджа: 1) радарограмма; 2) спектрограмма; 3) граница выветривания; 4) проектное расположение коттеджа

Fig. 4. Two-dimensional model of underground mine workings under the cottage construction site: 1) radarogram; 2) spectrogram; 3) weathering boundary; 4) cottage design location

Для повышения надежности оценки безопасности строительства геофизическими методами обследована структура подработанного горного массива. Методом ССП по всему участку на глубинах 25 м отмечается граница между выветрелыми породами и крепким скальным основанием. В юго-западном углу георадаром выявлена зона глубиной 3 м, заполненная крупно- и мелкообломочным материалом. Индикато-

ры, которые могут быть идентифицированы как пустоты или дезинтегрированный массив, не обнаружены обоими методами.

Обсуждение результатов

В результате исследования горно-геологических условий заброшенной шахты по дайке Спасская и Кривая Березовского месторождения, визуального

обследования поверхности, геофизических исследований массива горных пород в исследуемых границах, где предполагается строительство коттеджа, пустоты значимых размеров от подземных выработок отсутствуют. Это позволяет рассчитывать на безопасное строительство коттеджа в западной части в соответствии с желанием застройщика.

Под участком могут присутствовать микропустоты объемом до 1 м^3 на глубине 18 м. Эти пустоты могут быть расположены только в западной части. На остальной площади подземных горных выработок нет. Интенсивные и опасные деформации грунта исключаются.

Из возможных вредных проявлений от подземной разработки в западной части могут произойти локальные просадки диаметром до 1–2 м и глубиной до 0,5 м. Наиболее вероятно, что такие явления могут быть в полосе шириной 5 м от западной границы участка. Они развиваются чаще всего в весенний и осенний периоды, когда количество атмосферных осадков увеличивается. Периодичность появления просадок составляет одно событие раз в 30–40 лет.

Эти параметры установлены из анализа базы провалов на Березовском месторождении, которая охватывает более 1100 случаев за 57 лет [28]. За это время небольшие проседания под конструкциями зданий проявлялись неоднократно и никогда не причиняли необратимых разрушений конструкций.

Ограничения исследования и обобщения его результатов

Предложения по практическому применению

В отношении частоты проявления просадок есть условия, которые могут увеличить их частоту. Это гидрогеологический режим. В настоящее время разработчик месторождения ведет водоотлив с глубины 500 м, и это создает водную депрессию в городе [11]. Если в результате полного истощения месторождения откачка воды будет прекращена, то обводнение горных пород в районе заброшенных шахт изменит их устойчивость. Об этом условии застройщик предупрежден.

Снижение частоты проседаний и их последствий необходимо компенсировать геотехническими мерами. Наиболее рациональными с учетом финансового бюджета застройщика станут следующие меры:

1. Визуальный осмотр территории с целью раннего обнаружения проседаний, провалов и т. п. Осмотры необходимо проводить во время весеннего таяния снега (апрель, май) и в дождливый осенний период (сентябрь–ноябрь). Образование луж в местах, где они ранее отсутствовали, является признаком проседания поверхности.
2. Просадки поверхности засыпать скальным грунтом или щебнем с уплотнением. После ликвидации просадки установить вокруг опасной зоны ограждение на один месяц. В период активной стадии исключить доступ к месту деформирования людей и техники, не занятых в ликвидации просадки.
3. В соответствии с прогнозом локальные просадки поверхности диаметром до 1–2 м могут появиться в западной части участка, ширина которой 5 м.

Поэтому расположение капитальных сооружений рекомендуется выполнить с отступлением 6 м от западной границы участка.

Для того чтобы быть в полной уверенности об отсутствии значимых пустот, нужно пробурить несколько скважин. Глубина скважин должна составлять 18 м.

Результаты исследования используются на стадии планирования вариантов застройки территории и для выбора проектного расположения строений на территории. Исследование снижает риск аварий и чрезвычайных ситуаций при застройке и эксплуатации территорий в местах залегания подземных горных выработок.

Предложения по направлению будущих исследований

Опыт исследования участка земли над заброшенной шахтой, который расположен на краю опасной территории, дополняет нашу коллекцию строительства в опасных местах. Мы исследовали более 300 Ар подработанных территорий в различных городах Свердловской и Челябинской областей России [6–8, 17, 18]. Безаварийная эксплуатация зданий и сооружений на обследованных площадях подтверждает эффективность исследований. В дальнейших планах исследований мы хотим снизить экспертность некоторых оценок безопасности территорий над заброшенными шахтами и создать оценочный рейтинг, который позволит по важным критериям качественно и стандартизировано подходить к регламентированию строительства в опасных местах.

Заключение

На основе моделирования и инструментальной диагностики геофизическими методами оценено состояние пород подработанного горного массива, сделан прогноз развития процесса сдвижения и даны рекомендации по использованию подработанного земельного участка. Исследованиями установлено, что над заброшенной шахтой можно построить коттедж без риска необратимых повреждений во время эксплуатации. Земля безопасна для строительства и проживания. Определены геометрические параметры и частота проявлений вредного влияния подземной разработки. Потенциальный ущерб для здания минимален, если его расположить с учетом рекомендаций. Конструктивные мероприятия, направленные на противодействие деформациям от подработки, не требуются. В целом позитивные результаты исследований показывают, что в том месте возможно строительство зданий более высокого уровня ответственности, чем коттедж, и повышают стоимость этого земельного участка.

Авторы благодарят исследователя Алексея Замятина лаборатории предотвращения техногенных катастроф Института горного дела в городе Екатеринбург за выполнение геофизических исследований.

Работа выполнена в рамках Госзадания № 0405-2019-0007. Тема 3 (2019-2021 гг.) «Методические основы районирования территории Российской Федерации по риску техноприродных катастроф, обусловленных современными геодинамическими движениями земной коры, на опасных и уникальных объектах недропользования».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gankhuuyag U., Gregoire F. Managing mining for sustainable development: a sourcebook. – Bangkok: United Nations Development Programme/UNDP and UN Environment, 2018. – 116 p.
2. Challenges and strategies of abandoned mine rehabilitation in South Africa: the case of asbestos mine rehabilitation / H. Cornelissen, I. Watson, E. Adam, T. Malefetse // Journal of Geochemical Exploration Publisher. – 2019. – V. 205. – 106354. URL: <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2019.106354> (дата обращения 08.01.2021).
3. Post-mining regions in Central Europe. Problems, Potentials, Possibilities / Eds. P. Wirth, B. Černič Mali, W. Fischer. – München: Oekom, 2012. – 274 p.
4. Leigh Sharpe. Civil engineering & mining related geohazards – a clients guide to the regulatory process. URL: <https://www.emcouncils.gov.uk/write/TCA%20Permissions%20Process.pdf> (дата обращения 08.01.2021).
5. Otamonga J.-P., Poté J.W. Abandoned mines and artisanal and small-scale mining in Democratic Republic of the Congo (DRC): survey and agenda for future research // Journal of Geochemical Exploration. – 2020. – V. 208. – 106394. URL: <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2019.106394> (дата обращения 08.01.2021).
6. Усанов С.В. Подработанные подземными работами территории в г. Березовский и оценка возможности их использования // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2010. – № 10. – С. 349–352.
7. Усанова А.В., Усанов С.В. Геомеханическая информационная модель влияния ликвидированного подземного рудника в городе Верхняя Пышма // Маркшейдерия и недропользование. – 2014. – № 5. – С. 38–40.
8. Усанов С.В., Усанова А.В. Обоснование мер безопасности при застройке территорий над старыми горными выработками по результатам комплексных исследований // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2020. – № 3-1. – С. 246–254. Available at: <https://giab-online.ru/files/Data/2020/3/246-254.pdf> (дата обращения 08.01.2021).
9. Есюнин О. Город на «круге дырявого сыра» // Инженерная защита. – 2015. – № 1 (6). – С. 26–35.
10. Мамаев Ю.А., Ястребов А.А. Комплексная защита подработанной территории калийного рудника в Пермском крае РФ // Инженерная защита. – 2015. – № 3 (8). – С. 26–35.
11. Далатказин Т.Ш., Коновалова Ю.П. Прогноз последствий затопления березовского рудника // Проблемы недропользования. – 2017. – № 3 (14). – С. 60–66.
12. Далатказин Т.Ш., Харисов Т.Ф. Исследование последствий затопления подземного рудника на селитебной территории // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2019. – № 2. – С. 38–51.
13. Cuenca M.C., J. Hooper A., Hanssen R.F. Surface deformation induced by water influx in the abandoned coal mines in Limburg, The Netherlands observed by satellite radar interferometry // Journal of Applied Geophysics. – 2013. – V. 88. – P. 1–11. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2012.10.003> (дата обращения 08.01.2021).
14. Хоменко В.П. Суффозия: терминология и феноменология // Опасные для строительства геологические процессы: Сборник материалов Международного семинара, посвященного 70-летию доктора геолого-минералогических наук Виктора Петровича Хоменко. – Москва, 8 июня 2018. – М.: Изд-во МИСИ – МГСУ, 2019. – С. 6–15. URL: <https://mgsu.ru/resources/izdatelskaya-deyatelnost/izdaniya/izdaniya-otkr-dostupa/2019/opasniye-d-stroy-geol-proc-y/006-015.pdf> (дата обращения 08.01.2021).
15. Казначеев П.А., Камшилин А.Н. Опыт наблюдения за процессами провалообразования в городских условиях и возможные способы их мониторинга // Опасные для строительства геологические процессы: Сборник материалов Международного семинара, посвященного 70-летию доктора геолого-минералогических наук Виктора Петровича Хоменко. – Москва, 8 июня 2018. – М.: Изд-во МИСИ – МГСУ, 2019. – С. 30–32. URL: <https://ifo.mgsu.ru/resources/izdatelskaya-deyatelnost/izdaniya/izdaniya-otkr-dostupa/2019/opasniye-d-stroy-geol-proc-y/030-032.pdf> (дата обращения 08.01.2021).
16. Ярг Л.А. Методы инженерно-геологических исследований процесса и кор выветривания. – М.: Недра, 1991. – 139 с.
17. Усанов С.В., Усанова А.В. Мониторинг сдвижения поверхности при ликвидации и затоплении горных выработок Лебяжинского месторождения // Горный журнал. – 2017. – № 1. – С. 18–22. URL: <http://www.rudmet.ru/journal/1593/article/27341/> (дата обращения 08.01.2021).
18. Усанов С.В. Геодинамические движения горного массива при техногенном воздействии крупного горно-обогатительного комбината // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2011. – № S11. – С. 248–255.
19. Березовское золоторудное месторождение (история и минералогия): научное издание / В.Г. Альбрехт, А.С. Баталин, А.А. Баталина, Ю.В. Ерохин, Д.А. Клейменов. – Екатеринбург: Уральский рабочий, 2005. – 200 с.
20. Gennaro G.M., Abdolreza O. Building above underground coal mines // Structure magazine. – 2020. URL: <https://www.structuremag.org/?p=15768> (дата обращения 10.01.2021).
21. Cole K. Building over abandoned shallow mines. Paper 1: Considerations of risk and reliability // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts. – 1993. – V. 30. – Iss. 4. – P. A266. URL: [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(93\)92197-X](https://doi.org/10.1016/0148-9062(93)92197-X) (дата обращения 08.01.2021).
22. BestMaps - спутниковые фотографии и карты всего мира онлайн. URL: <https://bestmaps.ru/map/osm/opentopomap/6/56.758/61.844> (дата обращения 08.01.2021).
23. Инженерно-геофизические исследования в условиях подработанных территорий / В.П. Колесников, А.М. Пригара, А.В. Татаркин, А.А. Филimonчиков // Инженерные изыскания. – 2012. – № 9. – С. 69–77.
24. Замятин А.Л. Геофизические исследования на подработанных территориях // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2009. – № 2 – С. 88–93.
25. Luo T.X.H., Lai W.W.L. GPR pattern recognition of shallow subsurface air voids // Tunnelling and Underground Space Technology. – 2020. – V. 99. – 103355. URL: <https://doi.org/10.1016/j.tust.2020.103355> (дата обращения 08.01.2021).
26. Detecting, locating, and characterizing voids in disaster rubble for search and rescue / DaHu, Shuai Li, Junjie Chen, Vineet R. Kamat // Advanced Engineering Informatics. – 2019. – V. 42. – 100974. URL: <https://doi.org/10.1016/j.aei.2019.100974> (дата обращения 08.01.2021).
27. Kotyrba A., Kortas L. Sinkhole hazard assessment in the area of abandoned mining shaft basing on microgravity survey and modelling – case study from the Upper Silesia Coal Basin in Poland // Journal of Applied Geophysics. – 2016. – V. 130. – P. 62–70. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2016.04.007> (дата обращения 08.01.2021).
28. Ведерников А.С., Зуев П.И. Районирование подработанных территорий города Березовский // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2020. – № 3-1. – С. 37–45. URL: <https://giab-online.ru/files/Data/2020/3/37-45.pdf> (дата обращения 08.01.2021).

Поступила 23.06.2021 г.

Информация об авторах

Усанов С.В., кандидат технических наук, заведующий лабораторией сдвижения горных пород, Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук.

Усанова А.В., научный сотрудник лаборатории геомеханики подземных сооружений, Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук.

UDC 622.1

INVESTIGATION OF GROUND COLLAPSES OVER A SHALLOW ABANDONED MINE TO DETERMINE THE GEOTECHNICAL CONDITIONS OF INDIVIDUAL CONSTRUCTION

Sergey V. Usanov¹,
usv@igduran.ru

Anna V. Usanova¹,
anne.usanova@gmail.com

¹ Institute of Mining of Ural branch of RAS,
58, Mamin-Sibiryak street, Yekaterinburg, 620075, Russia.

The relevance of the study is caused by the need to construct buildings and structures over old abandoned mines. Construction is associated with the danger of failure of the earth's surface and the destruction of buildings. This problem is widespread all over the world.

The aim of the research is to determine the risk of building a small plot of land located above an old gold mine and the parameters of likely hazardous processes; to predict potential damage.

Methods: analysis of archival geological documents abandoned mines, reconstruction and two-dimensional modeling of mine workings under the studied area, on-site visual examination of the surface analysis of optical satellite imagery database analysis of the collapse surface geophysical sensing of the mountain massif with the surface.

Results. Using two-dimensional modeling, it was found that only one of two granitoid dikes developed within the boundaries of the study, is dangerous, since the other, according to geological conditions, is the main body lying outside the study. This facilitates the conditions for construction. Dangerous processes from the drift and orta dike, which falls on the site, can only be in the westernmost part with a width of 5 m. It is established that since 1957, no surface failures have been observed in this place, and the dangerous phenomena registered in the vicinity are the subsidence of the soil with a diameter of 1–2 m and a depth of 0,5 m. In the southwestern corner of the site above ort, a 3-meter-deep zone filled with coarse and fine-grained material was detected, which is most likely a trace of its collapse. Indicators that can be identified as voids or a disintegrated array are not detected by two methods.

Conclusions. The authors have made forecast of the parameters of an old mine harmful effect on stability of the surface. The research established that a cottage can be built on this site above an abandoned mine without the risk of permanent damage during operation. The land is safe for construction and living. The geometric parameters of the probable harmful effect of underground mining and the frequency of manifestations are determined. Geotechnical measures to minimize the possible harmful effects of an abandoned mine are proposed.

Key words:

Abandoned mine, old mine workings, ground collapse, subsidence, construction, safety, forecast and assessment, geotechnical measures, building placement conditions.

The authors appreciate Aleksey Zamyatin, the researcher of the laboratory of preventing human-made disasters at Mining Institute, Yekaterinburg, for geophysical research.

The research was carried out within the State task no. 0405-2019-0007. Topic 3 (2019–2021) «Methodological bases of zoning the territory of the Russian Federation by the risk of human-made disasters, caused by modern geodynamic movements of earth crust, at dangerous and unique objects of subsoil management».

REFERENCES

- Gankhuyag U., Gregoire F. *Managing mining for sustainable development: a sourcebook*. Bangkok, United Nations Development Programme, UNDP and UN Environment, 2018. 116 p.
- Cornelissen H., Watson I., Adam E., Malefetse T. Challenges and strategies of abandoned mine rehabilitation in South Africa: the case of asbestos mine rehabilitation. *Journal of Geochemical Exploration Publisher*, 2019, vol. 205, 106354. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2019.106354> (accessed 8 January 2021).
- Post-Mining Regions in Central Europe. Problems, Potentials, Possibilities*. Eds. P. Wirth, B. Čerňák, W. Fischer. München, Oekom, 2012. 274 p.
- Leigh Sharpe. *Civil engineering & mining related geohazards – a clients guide to the regulatory process*. Available at: <https://www.emcouncils.gov.uk/write/TCA%20Permissions%20Process.pdf> (accessed 8 January 2021).
- Otamonga J.-P., Poté J.W. Abandoned mines and artisanal and small-scale mining in Democratic Republic of the Congo (DRC). Survey and agenda for future research. *Journal of Geochemical Exploration*, 2020, vol. 208, 106394. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2019.106394> (accessed 8 January 2021).
- Usanov S.V. Podrabortannye podzemnymi rabotami territorii v g. Berezovskiy i otsenka vozmozhnosti ikh ispolzovaniya [The territories underworked by underground works in Berezovsky and the assessment of the possibility of their use]. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten*, 2010, no. 10. pp. 349–352.
- Usanova A.V., Usanov S.V. Geomechanical information model of abandoned underground mine influence in Verkhnyaya Pyshma. *Surveying and Subsurface Use*, 2014, no. 5, pp. 38–40. In Rus.
- Usanov S.V., Usanova A.V. Justification of safety measures at the construction of territories over old underground mining by the results of complex researches. *Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2020, no. 3-1. pp. 246–254. Available at: <https://giab-online.ru/files/Data/2020/3/246-254.pdf> (accessed 8 January 2021).
- Esyunin O. Gorod na «krugle dyryavogo syra» [City on the «circle of leaky cheese»]. *Inzhenernaya zashchita*, 2015, no. 1 (6), pp. 26–35.
- Mamaev Yu.A., Yastrebov A.A. Kompleksnaya zashchita podrabortannoy territorii kaliynogo rudnika v Permskom krae RF [Comprehensive protection of the under-developed territory of a potash mine in the Perm Region of the Russian Federation]. *Inzhenernaya zashchita*, 2015, no. 3 (8), pp. 26–35.
- Dalatkazin T.Sh., Konovalova Ju.P. Consequences forecast of the Berezovsky mine flooding. *Problems of Subsurface Use*, 2017, no. 3 (14), pp. 60–66. In Rus.

12. Dalatkazin T.Sh., Harisov T.F. Research of consequences of flooding of the underground mine in the residential territory. *Izvestiya Tula State University. Earth Sciences*, 2019, no. 2, pp. 38–51. In Rus.
13. Cuenca M.C., Hooper J.A., Hanssen R.F. Surface deformation induced by water influx in the abandoned coal mines in Limburg, The Netherlands observed by satellite radar interferometry. *Journal of Applied Geophysics*, 2013, vol. 88, pp. 1–11. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2012.10.003> (accessed 8 January 2021).
14. Khomenko V.P. Suffoziya: terminologiya i fenomenologiya [Suffusion: terminology and phenomenology]. *Opasnye dlya stroitelstva geologicheskie protsessy: Sbornik materialov Mezhdunarodnogo seminar, posvyashchennogo 70-letiyu doktora geologo-mineralogicheskikh nauk Viktora Petrovicha Khomenko* [Geological processes that are dangerous for construction: collection of materials of the International Seminar dedicated to the 70th anniversary of Doctor of Geological and Mineralogical Sciences Viktor Petrovich Khomenko]. Moscow, MISI – MGSU Publ., 2019. pp. 6–15. Available at: <https://mgsu.ru/resources/izdatelskaya-deyatelnost/izdaniya/izdaniya-otkr-dostupa/2019/opasniye-d-stroy-geol-proc-y/006-015.pdf> (accessed 8 January 2021).
15. Kaznacheev P.A., Kamshilin A.N. Opyt nablyudeniya za protsessami provalooobrazovaniya v gorodskikh usloviyakh i vozmozhnye sposoby ikh monitoringa [Experience of observing the processes of sinkhole formation in urban conditions and possible ways of monitoring them]. *Opasnye dlya stroitelstva geologicheskie protsessy: Sbornik materialov Mezhdunarodnogo seminar, posvyashchennogo 70-letiyu doktora geologo-mineralogicheskikh nauk Viktora Petrovicha Khomenko* [Geological processes that are dangerous for construction: collection of materials of the International Seminar dedicated to the 70th anniversary of Doctor of Geological and Mineralogical Sciences Viktor Petrovich Khomenko]. Moscow, MISI – MGSU Publ., 2019. pp. 30–32. Available at: <https://ifo.mgsu.ru/resources/izdatelskaya-deyatelnost/izdaniya/izdaniya-otkr-dostupa/2019/opasniye-d-stroy-geol-proc-y/030-032.pdf> (accessed 8 January 2021).
16. *Metody inzhenerno-geologicheskikh issledovaniy protsessa i kor vyvetrivaniya* [Methods of engineering and geological studies of the weathering process and crust]. Jarg L.A. Moscow, Nedra Publ., 1991. 139 p.
17. Usanov S.V., Usanova A.V. Monitoring sdvzheniya poverkhnosti pri likvidatsii i zatopenii gornykh vyrabotok Lebyazhinskogo mestorozhdeniya [Monitoring of surface movement during liquidation and flooding of mine workings of the Lebyazhinsky field]. *Gorny zhurnal*, 2017, no. 1, pp. 18–22. Available at: <http://www.rudmet.ru/journal/1593/article/27341/> (accessed 8 January 2021).
18. Usanov S.V. Geodynamic movements of rock massif at technogenic influence of the large mountain enterprise. *Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal)*, 2011, no. S11, pp. 248–255. In Rus.
19. Albreht V.G., Batalin A.S., Batalina A.A., Erokhin Yu.V., Klyemenov D.A. *Berezovskoe zolotorudnoe mestorozhdenie (istoriya i mineralogiya): nauchnoe izdanie* [Berezovskoe gold deposit (history and mineralogy): scientific publication]. Ekaterinburg, Uralskiy rabochiy Pub., 2005. 200 p.
20. Gennaro G.M., Abdolreza O. Building above underground coal mines. *Structure magazine*, 2020. Available at: <https://www.structuremag.org/?p=15768> (accessed 8 January 2021).
21. Cole K. Building over abandoned shallow mines. Paper 1: Considerations of risk and reliability. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1993, vol. 30, Iss. 4. pp. A266. Available at: [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(93\)92197-X](https://doi.org/10.1016/0148-9062(93)92197-X) (accessed 8 January 2021).
22. *BestMaps – satellite photos and maps of the whole world online*. Available at: <https://bestmaps.ru/map/osm/opentopomap/6/56.758/61.844> (accessed 8 January 2021).
23. Kolesnikov V.P., A.M. Prigara, A.V. Tatarkin, A.A. Filimonchikov. Engineering-geophysical investigations under conditions of undermined areas. *Engineering surveys*, 2012, no. 9, pp. 69–77. In Rus.
24. Zamyatin A.L. Geofizicheskie issledovaniya na podrabotannykh territoriyakh [Geophysical research in sub-developed areas]. *Gorny informatsionno-analiticheskiy byulleten*, 2009, no. 2, pp. 88–93.
25. Luo T.X.H., Lai W.W.L. GPR pattern recognition of shallow sub-surface air voids. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2020, vol. 99, 103355. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.tust.2020.103355> (accessed 8 January 2021).
26. DaHu, Shuai Li, Junjie Chen, Vineet R. Kamat. Detecting, locating, and characterizing voids in disaster rubble for search and rescue. *Advanced Engineering Informatics*, 2019, vol. 42, 100974. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.aei.2019.100974> (accessed 8 January 2021).
27. Kotyrba A., Kortas L. Sinkhole hazard assessment in the area of abandoned mining shaft basing on microgravity survey and modeling – case study from the Upper Silesia Coal Basin in Poland. *Journal of Applied Geophysics*, 2016, vol. 130, pp. 62–70. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2016.04.007> (accessed 8 January 2021).
28. Vedernikov A.S., Zuev P.I. Zoning of undermined urban territories in the area of the Berezovsky town. *Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal)*, 2020, no. 3-1, pp. 37–45. In Rus. Available at: <https://giab-online.ru/files/Data/2020/3/37-45.pdf> (accessed 8 January 2021).

Received 23 June 2021.

Information about the authors

Sergey V. Usanov, Cand. Sc., laboratory chief, Institute of Mining of Ural branch of RAS.

Anna V. Usanova, researcher, Institute of Mining of Ural branch of RAS.

УДК 550.837.21:550.8.052

УЧЕТ ВЛИЯНИЯ ВЕРХНЕЙ ЧАСТИ РАЗРЕЗА НА РЕЗУЛЬТАТЫ АУДИОМАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКИХ ЗОНДИРОВАНИЙ С ПОМОЩЬЮ КОНТРОЛИРУЕМОГО ИСТОЧНИКА В БЛИЖНЕЙ ЗОНЕ

Давыдов Вадим Анатольевич,
davyde@yandex.ru

Институт геофизики им. Ю.П. Булашевича УрО РАН,
Россия, 620016, г. Екатеринбург, ул. Амурдсена 100.

Актуальность. Работа направлена на устранение пробела в получении данных о верхней части разреза при аудиоманнителлурических зондированиях. Одновременно решается проблема неконтролируемого смещения кривых зондирований за счет гальванических искажений, вносимых приповерхностными неоднородностями.

Цель работы заключается в опробовании методики исследований методом аудиоманнителлурических зондирований совместно с контролируемым источником в ближней зоне для получения сведений о верхней части разреза и внесении статических поправок.

Методы. Аудиоманнителлурические зондирования проводились с помощью приемно-регистрирующей аппаратуры ОМАР-2 (ИГФ УрО РАН, г. Екатеринбург) в частотном диапазоне 60–16000 Гц. Основные принципы обработки аудиоманнителлурических зондирований основываются на базе ранее разработанного способа преобразования частотных кривых зондирований в геометрические кривые с учетом априорной информации. Для детального изучения верхней части разреза были использованы два метода: вертикальные электрические зондирования и дистанционные индукционные зондирования. Работы методом вертикальных электрических зондирований проводились комплектом аппаратуры ЭРА-МАКС (НПП «ЭРА», г. Санкт-Петербург) по стандартной методике. Дистанционные индукционные зондирования выполнены аппаратурой МЧЗ-8 (ИГФ УрО РАН, г. Екатеринбург) на частоте 10 кГц по отработанной ранее методике работ.

Результаты. Выполнены опытно-методические работы, где в качестве контролируемого источника выступают генератор электрического поля с гальваническим заземлением и излучатель переменного магнитного поля индукционного типа. Проведены сравнения результатов обработки аудиоманнителлурических зондирований с природным источником сигналов и с дополнительным возбуждением искусственного поля. Выяснено, что трансформированные разрезы с использованием контролируемых источников различных типов имеют близкие параметры, они характеризуются повышенной контрастностью и большей достоверностью при выделении локальных объектов. Предложен оптимальный вариант установки для измерений аудиоманнителлурических зондирований с дополнительным использованием индукционного источника поля типа вертикального магнитного диполя.

Выводы. Выполненные исследования показали, что использование контролируемого источника электромагнитного поля в ближней зоне улучшает информативность аудиоманнителлурических зондирований и позволяет получить более достоверную информацию о геологическом строении разреза за счет внесения статических поправок.

Ключевые слова:

Аудиоманнителлурические зондирования, импеданс, трансформация, вертикальный магнитный диполь, дистанционные зондирования, геоэлектрический разрез.

Введение

Аудиоманнителлурические зондирования (АМТЗ) являются вариантом метода магнитотеллурических зондирований (МТЗ), изучающих средние глубины и использующих в качестве источника естественные электромагнитные поля звукового диапазона. Основным природным источником энергии этих полей являются грозовые разряды молний и ионосферно-магнитосферные возмущения околоземной плазмы [1]. Частотный спектр сигналов аудиоманнителлурического (АМТ) диапазона крайне неравномерен из-за особенностей образования и распространения длинных и сверхдлинных волн. На низких частотах амплитуды сигналов максимальны, с ростом частоты спектральная плотность поля снижается, с минимумом на частотах от 2 до 6 кГц. Затем опять наблюдается увеличение интенсивности, с локальным максимумом на частоте около 10 кГц и последующим резким спадом в сторону высоких частот. Таким образом, отличия амплитуд сигналов на разных частотах может составлять несколько порядков, что создает ре-

альные трудности в измерениях и обработке АМТЗ. Для решения этой проблемы в ряде случаев дополнительно применяют метод исследований с контролируемым источником АМТ сигналов (Controlled Source Audio-frequency Magnetotelluric – CSAMT), работающий в диапазоне «природного минимума» [2, 3]. Измерения ведутся в дальней зоне, при значениях электромагнитного параметра $P = |k/r| > 10$, где k – волновое число, r – расстояние. Для выполнения условий больших значений параметра P источник должен обладать высокой мощностью, поскольку располагается на расстоянии первых километров от приемника. Обычно он представляет собой высоковольтный генератор, нагруженный на заземленную электрическую линию [4–6], реже используются генераторы тока с магнитными петлями [7, 8]. Контролируемые источники сигналов, работающие в дальней зоне, позволяют применять стандартные способы обработки магнитотеллурических данных без всяких изменений.

Еще одной из проблем магнитотеллурики является неконтролируемое смещение кривых зондирований за

счет статических искажений, вносимых приповерхностными неоднородностями. Кроме того, ограниченный частотный диапазон регистрируемых сигналов приводит к пробелу в получении данных о верхней части разреза (ВЧР). Глубина зондирования для метода АМТЗ определяется эффективной глубиной проникновения электрического поля $h_{эф}$ и зависит от частоты сигнала и величины удельного электрического сопротивления (УЭС) среды [9]:

$$h_{эф} \approx \frac{\delta}{\sqrt{2}} = \sqrt{\frac{\rho}{\omega\mu_0}},$$

где δ – толщина скин-слоя, м; ρ – удельное электрическое сопротивление однородной среды, Ом·м; ω – круговая частота электромагнитного поля; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м (магнитная проницаемость вакуума).

Для граничных частот аудио диапазона минимальная глубина зондирования хорошо проводящей среды составляет более 10 м, для высокоомных пород это значение еще больше. Чтобы получить сведения об электрических свойствах горных пород самой верхней части разреза, необходимо изучать радиочастоты длинноволнового и средневолнового диапазона. Для этого требуется отдельная специализированная аппаратура и датчики сигналов, ориентированные под другую модификацию магнитотеллурических методов – радиомагнитотеллурические зондирования (РМТЗ) [10]. Альтернативный выход из положения для изучения малых глубин заключается в применении дистанционных электромагнитных зондирований, работающих в ближней зоне. Такие наблюдения позволяют установить начальный уровень значений УЭС для магнитотеллурической кривой [11]. Цель данной работы заключается в опробовании методики исследований методом АМТЗ совместно с контролируемым источником в ближней зоне для получения сведений о ВЧР и внесении статических поправок. К основным задачам исследований относится сравнение результатов обработки и интерпретации классических аудиоманнителлурических зондирований и АМТЗ с дополнительным возбуждением искусственного поля.

Основные положения

Основным магнитотеллурическим параметром является импеданс среды Z , равный отношению взаимно перпендикулярных компонент напряженности электрического (E) и магнитного (H) полей. В классическом варианте магнитотеллурических зондирований для получения информации об электропроводности геологической среды проводят одновременные измерения пяти составляющих электромагнитного поля: E_x , E_y , H_x , H_y и H_z . Это дает возможность более точно оценить характер геоэлектрического разреза с учетом анизотропии. Аудиоманнителлурические зондирования можно проводить в упрощенном варианте, осуществляя последовательные измерения импеданса среды двухканальной аппаратурой:

$$Z_{xy} = E_x/H_y; Z_{yx} = E_y/H_x.$$

Получив значения взаимных импедансов, можно рассчитать кажущиеся сопротивления в ортогональ-

ных направлениях и общее эффективное сопротивление ρ_r по формулам [12]:

$$\rho_{xy} = |Z_{xy}|^2 / (2\pi \cdot f \cdot \mu_0); \rho_{yx} = |Z_{yx}|^2 / (2\pi \cdot f \cdot \mu_0); \rho_r = (\rho_{xy} \cdot \rho_{yx})^{0.5}.$$

Направленность измерений влияет на тип поляризации и, соответственно, на возможный характер искажения кривых зондирований. H -поляризации (TM -мода) соответствуют кривые кажущегося сопротивления при поперечном протекании первичного индуцированного тока, относительно основных элементов геологического строения. Измерения проводят установкой, в которой электрическая линия ориентирована поперек линейных структур (E_y), а магнитный датчик (H_x) – вдоль структур. Поперечные кривые ρ_{yx} сильно подвержены влиянию гальванических эффектов, проявляющихся в вертикальном смещении магнитотеллурических кривых, обусловленных изменением интегральной проводимости верхнего слоя. Над плохо проводящими приповерхностными образованиями кривые приподняты, над хорошо проводящими объектами опущены [13]. E -поляризация (TE -мода) наблюдается при ориентации электрической линии вдоль структур (E_x) с поперечным магнитным датчиком (H_y). Продольные кривые кажущегося сопротивления ρ_{xy} подвержены большему влиянию индукционных эффектов за счет протекания теллурических токов в линейных проводящих структурах [14].

Магнитотеллурические кривые являются частотными характеристиками геоэлектрического разреза и отражают изменение электрических свойств среды с глубиной. Высокие частоты характеризуют ВЧР, низкие частоты несут информацию о более глубинном строении разреза. Количественная интерпретация АМТЗ (получение геоэлектрического разреза) осуществляется с помощью решения обратной задачи, или инверсии. В зависимости от характера однородности разреза по основным направлениям используют одномерную (1D), двумерную (2D) или трехмерную (3D) инверсию [15–18]. Количественная интерпретация не отражает локальных особенностей выделенных структур, предоставляя интегральные характеристики разреза. А учитывая существование эквивалентных решений, даже наиболее вероятная инверсия может оказаться ошибочной. Качественная интерпретация магнитотеллурических данных осуществляется путем преобразования частотного псевдоразреза в глубинный разрез с помощью специальных трансформаций [19, 20]. В обоих случаях верхняя часть разреза представляется в виде эквивалентного слоя с условными характеристиками, вычисленными на основании плавной аппроксимации ограниченной частотной зависимости. Для более точной интерпретации параметры верхнего слоя можно задать на основании априорной информации о ВЧР. На этой основе ранее был разработан и опробован оригинальный способ трансформации частотных кривых [21]. Идея заключается в нахождении мощности скин-слоя, соответствующей заданному интервалу частот. Технология трансформации состоит в последовательном вычислении сверху вниз эффективной глубины зондирования для каждой рабочей частоты с учетом из-

менения кажущихся сопротивлений. При этом мощность и УЭС верхнего слоя задается на основании априорных данных, по результатам предыдущих геолого-геофизических работ. Основные этапы обработки аудиоманнитотеллурических данных включают:

- фильтрацию и отбраковку помех;
- получение спектров сигналов на основе преобразования Фурье;
- вычисление взаимных импедансов и кажущихся сопротивлений среды в ортогональных направлениях;
- расчет эффективного сопротивления и получение частотного псевдоразреза $\rho_r(f)$;
- трансформацию частотной зависимости $\rho_r(f)$ в глубинный разрез $\rho_r(h_{эф})$ с учетом информации о геоэлектрическом строении верхней части разреза.

Чтобы повысить корректность вычислений, необходимо иметь более точное представление о ВЧР, для этого можно воспользоваться результатами других методов электромагнитных зондирований. Наиболее распространенным методом изучения малых глубин являются вертикальные электрические зондирования (ВЭЗ). Однако они потребуют применения дополнительной аппаратуры и специализированного оборудования. С точки зрения оптимизации желательно проводить все измерения одной электрометрической станцией, а в качестве дополнительного источника использовать маломощный генератор звуковых частот с электрическим или магнитным возбуждением. Чтобы не изменять технологию наблюдений, наиболее подходящими будут относительные измерения электромагнитных компонент поля в ближней зоне источника. Этим условиям удовлетворяют дистанционные (геометрические) зондирования с вертикальными магнитными диполями (ВМД) и горизонтальными электрическими диполями (ГЭД). Измеряемым параметром может служить импеданс, либо отношение магнитных компонент.

Используя разные типы источников и приемников, можно получить многочисленные комбинации установок для дистанционного зондирования и электропрофилирования среды. Например, в существующем методе радиальных индукционных зондирований (РИЗ) проводятся измерения импеданса, а источником поля служат как магнитные петли, так и электрические диполи [22]. При этом приемная электрическая линия ориентируется перпендикулярно направлению на генератор (E_ϕ), а магнитный датчик устанавливается в позиции на источник сигнала (H_r). В зависимости от типа источника для вычисления кажущегося сопротивления (КС) применяются формулы [23]:

$$\rho_k = Z \cdot r / 2 \text{ – для ГЭД,}$$

$$\rho_k = Z \cdot r / 4 \text{ – для ВМД,}$$

здесь $Z = E_\phi / H_r$ – импеданс среды в ближней зоне; r – расстояние между центрами питающих и приемных диполей, или разнос установки. Для симметричной заземленной электрической установки: $r = AB/2$.

В методе дистанционных индукционных зондирований (ДИЗ) в качестве источника и приемника сигналов используются ВМД. Технология изучения магнитных составляющих заключается в регистрации

вертикальной (H_z) и радиальной (H_r) компонент переменного магнитного поля. В ближней зоне кажущееся сопротивление рассчитывается по упрощенной формуле [24]:

$$\rho_k = 2 \cdot f \cdot r^2 \cdot |H_z| / |H_r|$$

где r – разнос установки, выраженный в километрах, а частота f – в герцах.

Основной проблемой сопоставления дистанционных и частотных зондирований является то, что в первом случае рассматривается зависимость УЭС от величины разноса, а во втором – от частоты. Трансформация частотных кривых АМТЗ в геометрические кривые позволяет привести данные к общим единицам измерений. Для дистанционных зондирований эффективная глубина проникновения электрического поля определяется расстоянием между источником и приемником. Для совмещения разрезов кажущихся сопротивлений, полученных разными методами, по оси глубин следует откладывать эффективную глубину исследования $h_{эф}$, составляющую для ВЭЗ $AB/4$, для дипольных электрических установок – $r/2$, для ДИЗ – $r/4$. За счет использования при пересчете кривых АМТЗ информации о верхней части разреза, полученной при помощи одного из методов дистанционных зондирований, создается взаимная увязка величин УЭС обоих методов.

Методика исследования

Аудиоманнитотеллурические исследования проводились с помощью универсальной двухканальной приемно-регистрирующей аппаратуры ОМАР-2, позволяющей работать с широкополосными сигналами в реальном масштабе времени [25]. Стандартные наблюдения естественного АМТ поля велись в частотном диапазоне 60–16000 Гц. На каждой точке зондирования последовательно проводилась запись двух взаимно перпендикулярных составляющих электромагнитного поля E_x-H_y и E_y-H_x . Время записи каждой пары компонент составляла около 5 минут. Для измерения электрического поля использовались заземленные линии MN длиной 20 м, для регистрации магнитных составляющих – активные индукционные датчики АМД-50 с линейной амплитудно-частотной характеристикой в рабочем диапазоне частот и чувствительностью 50 В/(А/м) [26].

Для детального изучения верхней части разреза были опробованы два метода: ВЭЗ и ДИЗ. Работы методом ВЭЗ проводились комплектом аппаратуры ЭРА-МАКС (НПП «ЭРА», г. Санкт-Петербург) по стандартной методике [27]. Использовалась симметричная 4-электродная установка Шлюмберже ($AMNB$) с выносом питающих электродов $AB/2$ на расстояния от 1,5 до 150 м с логарифмическим шагом. Измерения проводились при стабилизированном токе в питающей линии от 10 до 50 мА. Кажущееся сопротивление рассчитывалось по стандартной формуле:

$$\rho_k = k \cdot U_{MN} / I_{AB},$$

где k – геометрический коэффициент установки (м); U_{MN} – напряжение между приемными электродами MN (мВ); I_{AB} – ток, подающийся в линию AB (мА).

Результаты количественной интерпретации ВЭЗ послужили, наряду с геологическими данными, основой для оценки достоверности построения трансформированных глубинных разрезов АМТЗ с коррекцией статических искажений.

Дистанционные индуктивные зондирования выполнены аппаратурой МЧЗ-8 (Институт геофизики УрО РАН, г. Екатеринбург) [28] на частоте 10 кГц по отработанной в нашей лаборатории методике работ. Электромагнитное поле генерировалось ВМД, измерялись две ортогональные составляющие переменного магнитного поля: H_z и H_r . Приемник располагался на точке зондирования, а генератор последовательно относился на расстояние (r) от 5 до 100 м вдоль профиля с шагом 5–10 м.

Эффективное удельное электрическое сопротивление в этом случае рассчитывается по уточненной формуле, учитывающей волновой параметр [29]:

$$\rho_{эф} = 2D \cdot f \cdot r^2 \cdot |H_z| / |H_r|,$$

где D – коэффициент нормировки. При выполнении условий ближней зоны волновой параметр поля меньше единицы, а коэффициент D примерно равен единице. Область средних параметров $1 < P < 10$ характеризует промежуточную зону, где D находится из

функциональных зависимостей от магнитных отношений в однородном полупространстве.

По результатам измерений строились совмещенные кривые АМТЗ и дистанционных зондирований на едином бланке. На основе сопоставления формы кривых проводилась корректировка статических искажений и стыковка кривых для получения единой зависимости кажущихся сопротивлений от эффективной глубины исследований, с учетом ВЧР. На основе пересчета полученных данных строился скорректированный глубинный разрез, который сравнивался с имеющейся геолого-геофизической информацией на предмет достоверности.

Результаты исследования

Способ преобразования частотного псевдоразреза в разрез эффективных глубин, с учетом априорной информации о ВЧР, хорошо зарекомендовал себя при исследованиях рудных объектов [30, 31]. Трансформированный глубинный разрез КС неплохо согласуется с результатами двухмерной (2D) инверсии АМТЗ, полученными с помощью программы ZondMT2d [32], в чем можно убедиться на представленном примере по одному из контрольных профилей Института геофизики УрО РАН (рис. 1).

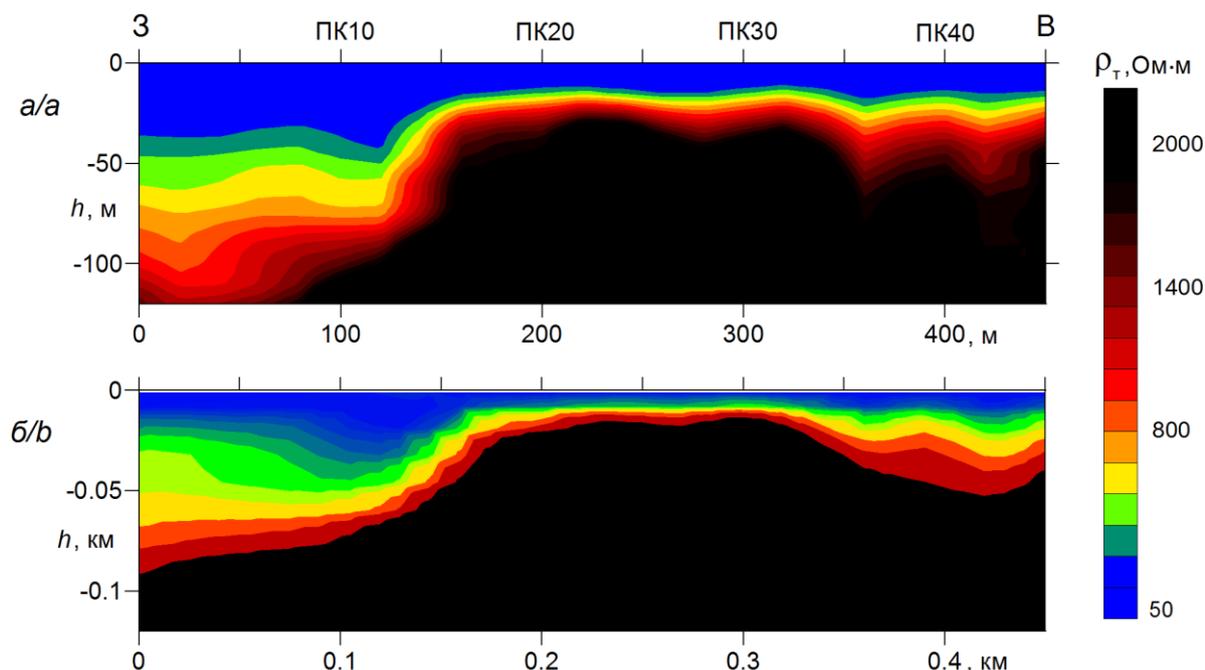


Рис. 1. Сравнение разрезов, полученных в результате трансформации (а) и двухмерной (2D) инверсии (б) аудиоманнителлурических зондирований на контрольном профиле

Fig. 1. Comparison of sections obtained as a result of transformation (a) and two-dimensional (2D) inversion (b) of audiomagnetotelluric soundings on the control profile

Указанный профиль расположен в зоне влияния регионального разлома, разделяющего геологические формации западного и восточного склона Урала, вкрест простираения основных структур. Вмещающими породами являются вулканогенно-осадочные образования с локальными зонами сульфидной минерализации. На сравнительных разрезах отмечается, что величина и характер поведения УЭС в обоих случаях

в основном совпадают, однако глубина залегания характерных структур зачастую отличается. Причиной может служить неправильное задание характеристик верхней части разреза, от которых зависят начальные условия пересчета кривых зондирований. Действительно, для одного участка работ обычно вводится одно среднее значение УЭС и глубины залегания первого слоя, но в реальности эти параметры могут

сильно изменяться в пределах профиля. Зная точную информацию о поверхностных отложениях в каждой точке зондирования, можно получить более точный геоэлектрический разрез. Опытно-методические АМТ измерения с дополнительными электромагнитными зондированиями показали правомерность сделанных выводов. На первом этапе было проведено сравнение результатов измерений ВЭЗ и АМТЗ в одних точках зондирования. Большинство полученных кривых неплохо стыкуются друг с другом в местах перекрытий, повторяя основные особенности и сохраняя близкие

величины кажущихся сопротивлений. Это свидетельствует о правильности выбора средних значений УЭС и мощности верхнего слоя для пересчета АМТЗ. Присутствие сильных техногенных помех при аудиоманнителлурических измерениях увеличивает дисперсию и может привести к локальному смещению и пересечению кривых. При наличии геологической неоднородности или сильной анизотропии верхней части разреза может проявиться эффект «ворот» (рис. 2), подобный кривым ВЭЗ при переходе на другую длину приемной линии.

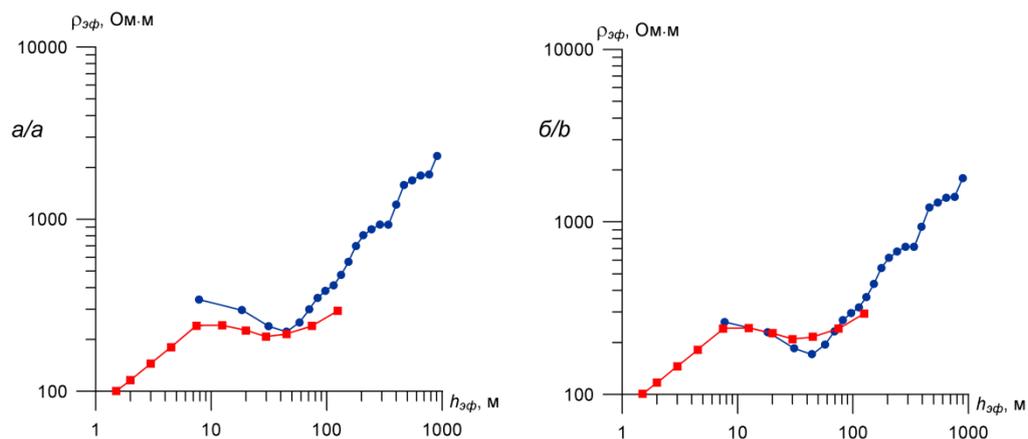


Рис. 2. Графики кривых вертикальных электрических зондирований (красным цветом) и трансформированных кривых аудиоманнителлурических зондирований (синим цветом): а) исходная аудиоманнителлурическая кривая немного приподнята относительно кривой вертикального электрического зондирования; б) корректировка аудиоманнителлурической кривой к уровню кривой вертикального электрического зондирования

Fig. 2. Graphs of curves of vertical electrical soundings (red color) and transformed curves of audiomagnetotelluric soundings (blue color): a) the original audiomagnetotelluric curve is slightly raised relative to the curve of vertical electrical sounding; b) correction of the audiomagnetotelluric curve to the level of the vertical electrical sounding curve

Смещения кривых легко устраняются соответствующим сдвигом, а для плавного перехода одной кривой в другую можно использовать сглаживающую интерполяцию. Главным условием коррекции будет сдвиг только кривой АМТЗ к неизменяемой кривой ВЭЗ,

принимаемой в качестве репера. Аналогичные измерения и сопоставления были выполнены для ДИЗ и АМТЗ, которые показали схожие результаты. Отличия заключаются в уменьшении области перекрытия и увеличении, в ряде случаев, ширины «ворот» (рис. 3).

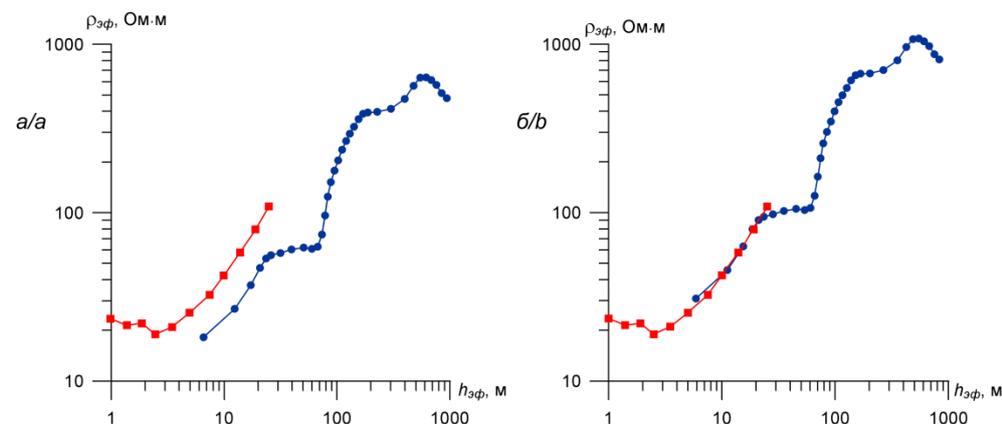


Рис. 3. Графики кривых дистанционных индукционных зондирований (красным цветом) и трансформированных кривых аудиоманнителлурических зондирований (синим цветом): а) исходная аудиоманнителлурическая кривая опущена относительно кривой дистанционного индукционного зондирования; б) корректировка аудиоманнителлурической кривой к уровню кривой дистанционного индукционного зондирования

Fig. 3. Graphs of curves of remote induction soundings (red color) and transformed curves of audiomagnetotelluric soundings (blue color): a) the original audiomagnetotelluric curve is omitted relative to the curve of remote induction sounding; b) correction of the audiomagnetotelluric curve to the level of the remote induction sensing curve

Возможно, что некоторые виды геологических неоднородностей вблизи поверхности могут оказывать влияние и на результаты индукционных зондирований. Вопрос, который требовал более детального рассмотрения, это насколько отличаются поправки в зависимости от типа контролируемого источника. Для этого были пересмотрены результаты ряда работ на геологических объектах Урала, в составе которых проводились электромагнитные зондирования: ВЭЗ, ДОЗ (дипольно-осевое зондирование), ДИЗ и РИЗ. После анализа ситуации выбраны несколько параметрических профилей, на которых были проведены аудиоманнителлурические зондирования. Кривые АМТЗ были преобразованы двумя способами с учетом информации о ВЧР, полученной с помощью гальванических и индукционных установок. Результаты пересчета свидетельствуют о практически взаимной идентичности большинства трансформированных кривых вне зависимости от типа генераторной установки (рис. 4).

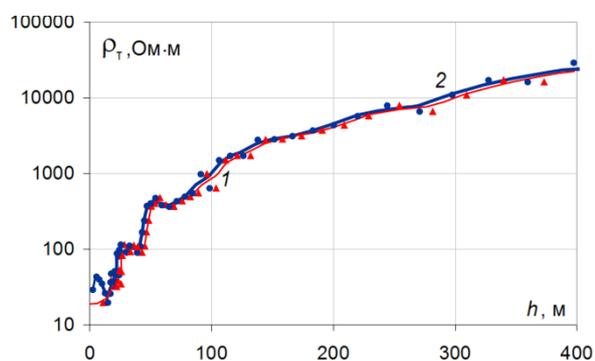


Рис. 4. Исправленные за верхнюю часть разреза графики трансформированных кривых аудиоманнителлурических зондирований с использованием контролируемых источников гальванического (1 – красным цветом) и индукционного (2 – синим цветом) типов

Fig. 4. Graphs of the transformed curves of audiomagnetotelluric soundings using controlled sources of galvanic (1 – red color) and induction (2 – blue color) types, corrected for the upper part of the section

При этом отмечается, что количество слоев ВЧР и значения их удельных сопротивлений могут отличаться по результатам интерпретации различными методами зондирований. Однако суммарная продольная проводимость интегрального слоя, за который вносится первичная поправка, сохраняет близкие значения, как при кондуктивном, так и при индуктивном возбуждении сигнала. Не учитываемые резкие изменения электропроводности в верхней части разреза могут сильно исказить результаты интерпретации на глубине. Например, при появлении сверху низкоомного слоя эффективная глубина зондирования снижается, а в случае высокоомных наносов глубинность исследований возрастает. Учет электрического сопротивления ВЧР в каждой точке зондирования позволяет внести правильную поправку и устранить искажение геоэлектрического разреза. Это напоминает внесение статических поправок за зону малых скоростей в сейсморазведочном методе общей глубинной точки (ОГТ). От корректности определения статических поправок в методе ОГТ напрямую зависит качество глубинного сейсмического разреза. В нашем случае качество трансформированного геоэлектрического разреза зависит от точности внесения поправки за счет дистанционных зондирований. Разница в определении глубины залегания опорного горизонта, с внесением поправки и без нее, может варьировать от единиц до десятков метров и более.

Полученный опыт позволяет предложить наиболее оптимальный вариант установки для измерений АМТЗ с одновременным изучением ВЧР. Установка содержит стандартную аппаратуру АМТЗ (в нашем случае – ОМАР-2), а в качестве контролируемого источника выступает генератор индукционной аппаратуры (например, ДЭМП или ФАГР), нагруженный на вертикальный магнитный диполь, возбуждающий первичное поле H_0 . Рабочая частота (f) выбирается в диапазоне от 2 до 16 кГц. Методика наблюдений аналогична дистанционным индуктивным зондированиям с измерением ортогональных составляющих переменного магнитного поля H_z и H_y . Приемник АМТЗ располагается на точке зондирования, а генератор последовательно относится на различные расстояния по линии профиля (рис. 5).

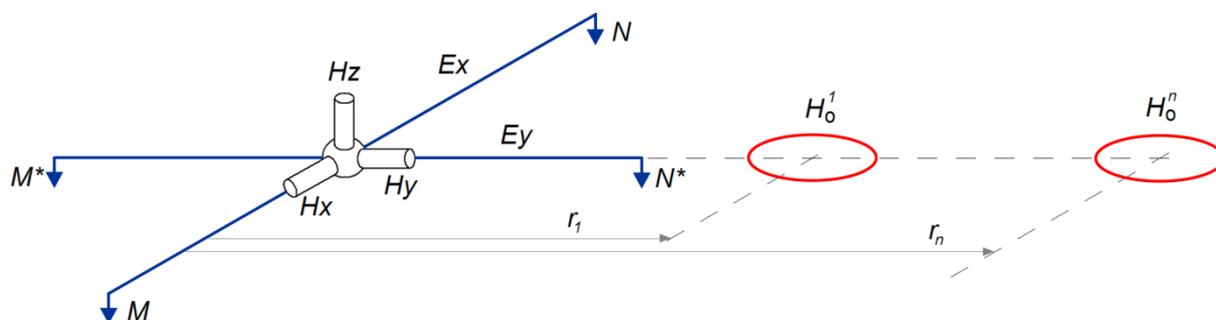


Рис. 5. Система наблюдений аудиоманнителлурических зондирований с дополнительным использованием контролируемого источника (вертикального магнитного диполя) в ближней зоне

Fig. 5. Observation system of audiomagnetotelluric soundings with additional use of a controlled source (vertical magnetic dipole) in the near zone

Время измерения при каждой новой установке генератора не превышает 30 секунд. Эффективная глубина зондирования равна одной четверти разноса диполей, а точка записи относится к месту установки приемника.

Для опробования работоспособности установки проведены специальные опытно-методические работы на Кунгурковском параметрическом профиле. Начало профиля слагают мраморированные известняки, затем следуют серпентинизированные ультрабазиты, а в конце профиля распространены разнообразные вулканогенные породы основного состава. Поро-

ды обладают разными свойствами, широтной зональностью изменения электропроводности и крутым падением границ. Мощность рыхлых отложений изменяется от нескольких метров до 50 м. Удельные электрические сопротивления в разрезе изменяются более чем на два порядка: от 12 Ом·м у глинистых слоев до 2000 Ом·м и выше в серпентинизированных ультраосновных породах. Трансформированные АМТ разрезы, с использованием генератора и без него, визуально очень похожи друг на друга, а также имеют близкие параметры изменения по глубине и удельному электрическому сопротивлению (рис. 6).

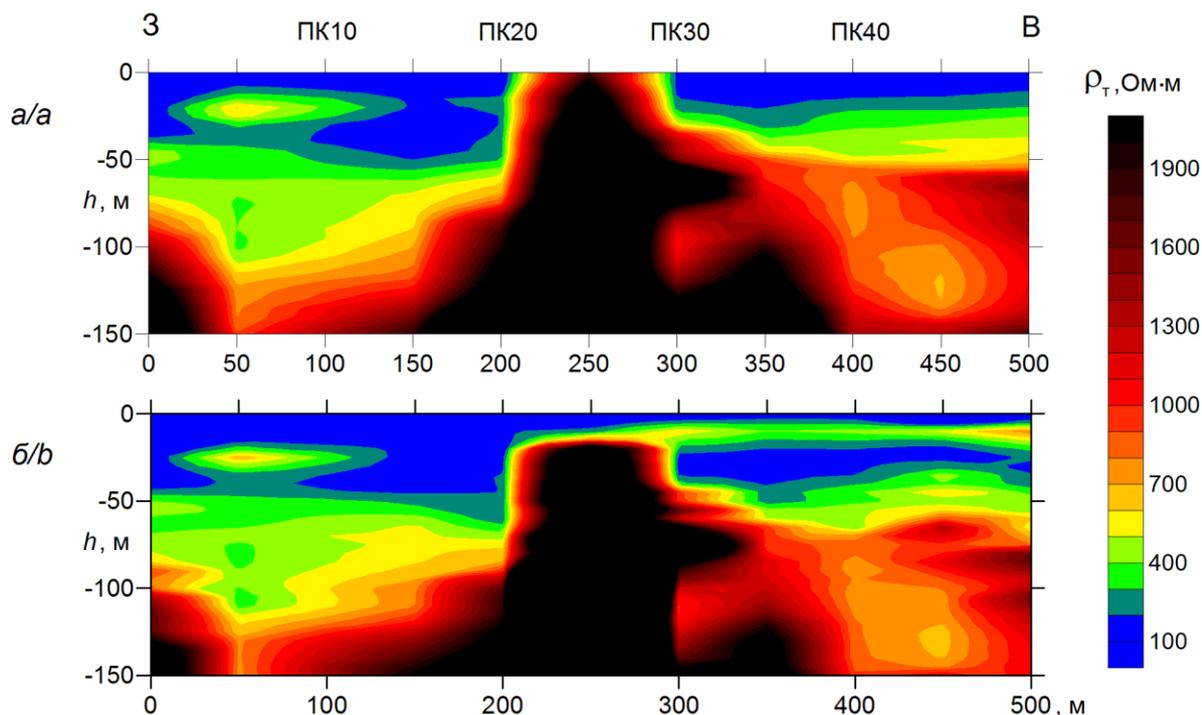


Рис. 6. Трансформированные разрезы аудиоманнителлурических зондирований на Кунгурковском профиле: а) по классической схеме, без внесения поправок; б) с использованием контролируемого источника типа вертикального магнитного диполя и внесением поправок за верхнюю часть разреза

Fig. 6. Transformed sections of audiomagnetotelluric soundings on the Kungurkov profile: а) according to the classical scheme, without making corrections; б) using a controlled source such as a vertical magnetic dipole and making corrections for the upper part of the section

В то же время разрез АМТЗ с внесенными статическими поправками имеет лучшую контрастность и большую достоверность при выделении локальных объектов. На участке распространения известняков, перекрытых мощным слоем низкоомных отложений (ПК0–ПК20), разрезы практически совпадают – скажется однородный характер свойств ВЧР. Все меняется с пикета ПК20: по результатам обработки классических АМТЗ, залегающие здесь серпентиниты выходят на поверхность, однако на самом деле они закрыты своей корой выветривания (ПК20–ПК30), хорошо видной на скорректированном разрезе (рис. 6, б). В интервале пикетов ПК30–ПК50 залегают вулканы, перекрытые «слоеным пирогом» рыхлых отложений разного состава. На стандартном разрезе АМТЗ эти осадочные наносы не расчлениются, а поверхность коренных пород выглядит довольно ровно. На разрезе АМТЗ с внесенными поправками можно уве-

ренно выделить три слоя коры выветривания вулканитов с разными значениями сопротивлений, а также рассмотреть более детально структуру коренных пород. Все особенности скорректированного геоэлектрического разреза АМТЗ подтверждаются геологическими данными и результатами других геофизических работ.

Заключение

Выполненные исследования показали, что использование контролируемого источника электромагнитного поля в ближней зоне улучшает информативность аудиоманнителлурических зондирований и позволяет получить более достоверную информацию о геологическом строении разреза за счет внесения статических поправок. Обработка результатов аудиоманнителлурических измерений осуществляется путем трансформации частотного псевдоразреза в глубин-

ный геоэлектрический разрез с учетом сведений о верхней части разреза, полученных с помощью дистанционных зондирований. В качестве дополнительного источника может выступать генератор электрического поля с гальваническим заземлением или излучатель переменного магнитного поля индукционного типа. Трансформированные разрезы с использо-

ванием различных типов источников имеют близкие параметры. С учетом более простых полевых наблюдений применение генератора индукционного типа является наиболее эффективным для внесения поправок за верхнюю часть разреза при интерпретации аудиоманнителлурических зондирований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Xavier G., Jones A. G. Atmospheric sources for audiomagnetotellurics (AMT) sounding // *Geophysics*. – 2002. – V. 67. – № 2. – P. 448–458.
2. Goldstein M.A., Strangway D.W. Audio-frequency magnetotellurics with a grounded electric dipole source // *Geophysics*. – 1975. – № 40. – P. 669–683.
3. Rydman O. Data processing of Controlled Source Audio Magnetotelluric (CSAMT) Data. – Uppsala: Uppsala University, 2019. – 36 p.
4. Zonge K.L., Ostrander A.O., Emer D.F. Controlled-source Audio-frequency Magnetotelluric Measurements // *Magnetotelluric Methods*. – Tulsa: Society of Exploration Geophysicists, 1985. – P. 749–763.
5. Shevtsov A.N. Joint interpretation of magnetotelluric and CSAMT data on the Kola Peninsula (Kovdor Area) // *Practical and Theoretical Aspects of Geological Interpretation of Gravitational, Magnetic and Electric Fields*. – Cham: Springer, 2019. – P. 23–30.
6. Zhang M., Farquharson C.G., Liu C. Improved controlled source audio-frequency magnetotelluric method apparent resistivity pseudo-sections based on the frequency and frequency-spatial gradients of electromagnetic fields // *Geophysical Prospecting*. – 2021. – V. 69. – № 2. – P. 474–490.
7. McPhee D.K., Chuchel B.A., Pellerin L. Audiomagnetotelluric data from Spring, Cave, and Coyote Spring Valleys, Nevada. – Washington: US Geological Survey, 2006. – 15 p.
8. Explorations of gold and lead-zinc deposits using a magnetotelluric method: case studies in the Tianshan-Xingmeng Orogenic Belt of Northern China / Q. Zeng, Q. Di, T. Liu, G. Li, C. Yu, P. Shen, H. Liu, J. Ye. // *Ore Geology Reviews*. – 2020. – V. 117. – P. 103283 (36 p).
9. Weidelt P. The inverse problem of geomagnetic induction // *Journal of Geophysics*. – 1972. – V. 38. – P. 257–289.
10. Сараев А.К., Симаков А.Е., Шлыков А.А. Метод радиоманнителлурических зондирований с контролируемым источником // *Геофизика*. – 2014. – № 1. – С. 18–25.
11. Геоэлектрический разрез литосферы Северного Урала / А.Г. Дьяконова, К.С. Иванов, П.Ф. Астафьев, В.С. Вишнев, А.Д. Коноплин // *Физика Земли*. – 2007. – № 4. – С. 15–20.
12. Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И. Модели и методы магнитотеллурики. – М.: Научный мир, 2009. – 680 с.
13. Effects of galvanic distortions on magnetotelluric data: Interpretation and its correction using deep electrical data / J. Stephen, S.G. Gokarn, C. Manoj, S.B. Singh // *Journal of Earth System Science*. – 2003. – V. 112. – № 1. – P. 27–36.
14. Жамалетдинов А.А. Магнитотеллурический метод изучения строения массивов горных пород. – Апатиты: Петрозаводский государственный университет, 2014. – 103 с.
15. Oldenburg D.W. One-dimensional inversion of natural source magnetotelluric observations // *Geophysics*. – 1979. – V. 44. – № 7. – P. 1218–1244.
16. Rodi W., Mackie R. Non linear conjugate gradient algorithm for 2D magnetotelluric inversion // *Geophysics*. – 2001. – № 6 (1). – P. 174–187.
17. Ansari S.M., Craven J.A. A fully finite-element based algorithm for 3D magnetotelluric inversion. – Tulsa: Society of Exploration Geophysicists, 2020. – P. 555–559.
18. Ren Z., Kalscheuer T. Uncertainty and resolution analysis of 2D and 3D inversion models computed from geophysical electromagnetic data // *Surveys in Geophysics*. – 2020. – V. 41. – № 1. – P. 47–112.
19. Jones A.G. On the equivalence of the «Niblett» and «Bostick» transformations in the magnetotelluric method // *Journal of Geophysics*. – 1983. – V. 53. – № 1. – P. 72–73.
20. Schmucker U. Substitute conductors for electromagnetic response estimates // *Pure and applied geophysics*. – 1987. – V. 125. – № 2–3. – P. 341–367.
21. Давыдов В.А. Способ преобразования аудиоманнителлурических данных с учетом априорной информации // *Геофизические исследования*. – 2016. – Т. 17. – № 4. – С. 57–66.
22. Астраханцев Г.В. Индукционное зондирование при изучении контрастных по электропроводности сред. – Свердловск: УрО АН СССР, 1988. – 182 с.
23. Журавлева Р.Б., Самоделькина С.А. К решению обратной задачи дистанционных и частотных зондирований с гальваническим и индукционным возбуждением поля // *Теория и практика электромагнитных методов геофизических исследований: Сб. науч. трудов*. – Екатеринбург: Наука. Урал. отделение, 1992. – С. 6–18.
24. Вешев А.В., Любцева Е.Ф., Леончиков В.М. Временное руководство по методу электромагнитного зондирования с вертикальным магнитным диполем. – Л.: ЛГУ, 1978. – 55 с.
25. Давыдов В.А. Измерительная аппаратура ОМАР-2 для электромагнитных методов исследований // *Уральский геофизический вестник*. – 2015. – № 1 (25). – С. 37–41.
26. Давыдов В.А. Новые электромагнитные датчики для среднечастотной электроразведки // *Датчики и системы*. – 2017. – № 11. – С. 58–62.
27. Инструкция по электроразведке. – Л.: Недра, 1984. – 352 с.
28. Байдилов С.В., Человечков А.И. Аппаратура для высокочастотных индукционных зондирований МЧЗ-8 // *Уральский Геофизический Вестник*. – 2011. – № 1. – С. 4–8.
29. Давыдов В.А. Двухмерная инверсия дистанционных индукционных зондирований // *Вопросы естествознания*. – 2018. – № 1 (15). – С. 62–69.
30. Электрометрические исследования на Крылатовском руднике / В.А. Давыдов, Е.В. Арзамасцев, С.В. Байдилов, В.Ю. Горшков // *Известия вузов. Горный журнал*. – 2019. – № 3. – С. 64–71.
31. Давыдов В.А. Изучение техногенеза Дегтярского рудника с помощью аудиоманнителлурических экспресс-зондирований // *Записки Горного института*. – 2020. – Т. 243. – С. 379–387.
32. Каминский А.Е. Программа двумерной интерпретации данных магнитотеллурических зондирований (MT, AMT, PMT). ZondMT2d. Руководство пользователя. – СПб.: Zond geophysical software, 2020. – 123 с.

Поступила 23.06.2021 г.

Информация об авторах

Давыдов В.А., кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории экологической геофизики Института геофизики им. Ю.П. Булашевича УрО РАН.

UDC 550.837.21: 550.8.052

TAKING INTO ACCOUNT THE INFLUENCE OF THE UPPER PART OF THE SECTION ON THE RESULTS OF AUDIOMAGNETOTELLURIC SOUNDINGS USING A CONTROLLED SOURCE IN THE NEAR ZONE

Vadim A. Davydov,
davyde@yandex.ru

Bulashevich Institute of Geophysics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
100, Amundsen street, Yekaterinburg, 620016, Russia.

Relevance. The work is aimed at bridging the gap in obtaining data on the upper part of the section during audiomagnetotelluric sounding. At the same time, the problem of uncontrolled displacement of sounding curves due to galvanic distortions introduced by near-surface irregularities is being solved.

The main aim of this work is to test the research methodology by the audiomagnetotelluric sounding method together with a controlled source in the near zone to obtain information about the near-field distribution and the introduction of static corrections.

Methods. Audiomagnetotelluric soundings were carried out using the receiving and recording equipment OMAR-2 (Institute of Geophysics UB RAS, Yekaterinburg) in the frequency range of 60–16000 Hz. The basic principles of audiomagnetotelluric processing are based on the previously developed method for converting the frequency curves of soundings into geometric curves, taking into account a priori information. For a detailed study of the upper part of the section, two methods were used: vertical electrical sounding and remote induction sounding. The work by the vertical electrical sounding method was carried out with a set of ERA-MAX equipment (ERA, St. Petersburg) according to the standard method. Remote induction soundings were performed with the MFS-8 equipment (Institute of Geophysics UB RAS, Yekaterinburg) at a frequency of 10 kHz according to the previously developed methodology.

Results. Experimental and methodological works, where an electric field generator with galvanic grounding and an induction-type alternating magnetic field emitter act as a controlled source, were carried out. Comparisons of the results of processing audio magnetotelluric soundings with a natural source of signals and with additional excitation of an artificial field are carried out. It was found that the transformed sections using controlled sources of various types have similar parameters, they are characterized by increased contrast and greater reliability in the selection of local objects. An optimal version of the setup for audiomagnetotelluric measurements with the additional use of an induction field source such as a vertical magnetic dipole is proposed.

Conclusions. The studies performed shown that the use of a controlled source of an electromagnetic field in the near zone improves the information content of audiomagnetotelluric soundings and allows obtaining more reliable information about the geological structure of the section due to the introduction of static corrections.

Key words:

Audiomagnetotelluric sounding, impedance, transformation, vertical magnetic dipole, remote sensing, geoelectric section.

REFERENCES

- Xavier G., Jones A. G. Atmospheric sources for audiomagnetotellurics (AMT) sounding. *Geophysics*, 2002, vol. 67, no. 2, pp. 448–458.
- Goldstein M.A., Strangway D.W. Audio-frequency magnetotellurics with a grounded electric dipole source. *Geophysics*, 1975, no. 40, pp. 669–683.
- Rydman O. *Data processing of Controlled Source Audio Magnetotelluric (CSAMT) Data*. Uppsala, Uppsala University, 2019. 36 p.
- Zonge K.L., Ostrander A.O., Emer D.F. Controlled-source Audio-frequency Magnetotelluric Measurements. *Magnetotelluric Methods*. Tulsa, Society of Exploration Geophysicists, 1985. pp. 749–763.
- Shevtsov A.N. Joint Interpretation of Magnetotelluric and CSAMT Data on the Kola Peninsula (Kovdor Area). *Practical and Theoretical Aspects of Geological Interpretation of Gravitational, Magnetic and Electric Fields*. Cham, Springer, 2019. pp. 23–30.
- Zhang M., Farquharson C.G., Liu C. Improved controlled source audio-frequency magnetotelluric method apparent resistivity pseudo-sections based on the frequency and frequency-spatial gradients of electromagnetic fields. *Geophysical Prospecting*, 2021, vol. 69, no. 2, pp. 474–490.
- McPhee D.K., Chuchel B.A., Pellerin L. *Audiomagnetotelluric data from Spring, Cave, and Coyote Spring Valleys, Nevada*. Washington, US Geological Survey, 2006. 15 p.
- Zeng Q., Di Q., Liu T., Li G., Yu C., Shen P., Liu H., Ye J. Explorations of gold and lead-zinc deposits using a magnetotelluric method: case studies in the Tianshan-Xingmeng Orogenic Belt of Northern China. *Ore Geology Reviews*, 2020, vol. 117, pp. 103283 (36 p).
- Weidelt P. The inverse problem of geomagnetic induction. *Journal of Geophysics*, 1972, vol. 38, pp. 257–289.
- Saraev A.K., Simakov A.E., Shlykov A.A. Method of radio-magnetotelluric sounding with a controlled source. *Geofizika*, 2014, no. 1, pp. 18–25. In Rus.
- Dyakonova A.G., Ivanov K.S., Astafiev P.F., Vishnev V.S., Konoplin A.D. Geoelectric section of the lithosphere of the Northern Urals. *Fizika Zemli*, 2007, no. 4, pp. 15–20. In Rus.
- Berdichevsky M.N., Dmitriev V.I. *Models and Methods of Magnetotellurics*. Berlin, Springer, 2009. 563 p.
- Stephen J., Gokarn S.G., Manoj C., Singh S.B. Effects of galvanic distortions on magnetotelluric data: Interpretation and its correction using deep electrical data. *Journal of Earth System Science*, 2003, vol. 112, no. 1, pp. 27–36.
- Zhamaletdinov A.A. *Magnitotelluricheskiy metod izucheniya stroeniya massivov gornykh porod* [Magnetotelluric method for studying the structure of rock massifs]. Apatity, Petrozavodsk State University Publ., 2014. 103 p.
- Oldenburg D.W. One-dimensional inversion of natural source magnetotelluric observations. *Geophysics*, 1979, vol. 44, no. 7, pp. 1218–1244.
- Rodi W., Mackie R. Non linear conjugate gradient algorithm for 2D magnetotelluric inversion. *Geophysics*, 2001, no. 6 (1), pp. 174–187.
- Ansari S.M., Craven J.A. A fully finite-element based algorithm for 3D magnetotelluric inversion. Tulsa, Society of Exploration Geophysicists, 2020. pp. 555–559.
- Ren Z., Kalscheuer T. Uncertainty and resolution analysis of 2D and 3D inversion models computed from geophysical electromagnetic data. *Surveys in Geophysics*, 2020, vol. 41, no. 1, pp. 47–112.
- Jones A.G. On the equivalence of the «Niblett» and «Bostick» transformations in the magnetotelluric method. *Journal of Geophysics*, 1983, vol. 53, no. 1, pp. 72–73.
- Schmucker U. Substitute conductors for electromagnetic response estimates. *Pure and applied geophysics*, 1987, vol. 125, no. 2–3, pp. 341–367.

21. Davydov V.A. Method for converting audio magnetotelluric data with regard to a priori information. *Geofizicheskie issledovaniya*, 2016, vol. 17, no. 4, pp. 57–66. In Rus.
22. Astrakhantsev G.V. *Induktsionnoe zondirovanie pri izuchenii kontrastnykh po elektroprovodnosti sred* [Induction sounding in the study of media contrasting in electrical conductivity]. Sverdlovsk, UrO AN SSSR Publ., 1988. 182 p.
23. Zhuravleva R.B., Samodelkina S.A. K resheniyu obratnoy zadachi distantsionnykh i chastotnykh zondirovaniy s galvanicheskimi i induktsionnym vzbuzhdeniem polya [To the solution of the inverse problem of remote and frequency sounding with galvanic and induction field excitation]. *Teoriya i praktika elektromagnitnykh metodov geofizicheskikh issledovaniy. Sbornik nauchnykh trudov* [Theory and practice of electromagnetic methods of geophysical research: collection of articles. scientific. works]. Yekaterinburg, Nauka Publ., 1992. pp. 6–18.
24. Veshev A.V., Lyubtseva E.F., Leonchikov V.M. *Vremennoe rukovodstvo po metodu elektromagnitnogo zondirovaniya s vertikalnym magnitnym dipolem* [Interim guidance on the vertical magnetic dipole electromagnetic sounding method]. Leningrad, LGU Publ., 1978. 55 p.
25. Davydov V.A. Izmeritelnaya apparatura OMAR-2 dlya elektromagnitnykh metodov issledovaniy [OMAR-2 measuring equipment for electromagnetic research methods]. *Uralskiy geofizicheskiy vestnik*, 2015, no.1, pp. 37–41.
26. Davydov V.A. New electromagnetic sensors for medium-frequency electrical prospecting. *Datchiki i sistemy*, 2017, no. 11, pp. 58–62. In Rus.
27. *Instruktsiya po elektrorazvedke* [Electrical Survey Instructions]. Leningrad, Nedra Publ., 1984. 352 p.
28. Baydikov S.V., Chelovechkov A.I. Apparatura dlya vysokochastotnykh induktsionnykh zondirovaniy MCHZ-8 [Equipment for high-frequency induction sounding MFS-8]. *Uralskiy Geofizicheskiy Vestnik*, 2011, no. 1, pp. 4–8.
29. Davydov V.A. Dvukhmernaya inversiya distantsionnykh induktsionnykh zondirovaniy [Two-dimensional inversion of remote induction soundings]. *Voprosy yestestvoznaniya*, 2018, no. 1 (15), pp. 62–69.
30. Davydov V.A., Arzamastsev E.V., Baydikov S.V., Gorshkov V.Yu. Electrometric research at the Krylatovsky mine. *Izvestiya vuzov. Gornyy zhurnal*, 2019, no. 3, pp. 64–71. In Rus.
31. Davydov V.A. Study of the technogenesis of the Degtyarsky mine by audiomagnetotelluric express sounding. *Journal of Mining Institute*, 2020, vol. 243, pp. 379–387.
32. Kaminskiy A.E. *Programma dvumernoy interpretatsii dannykh magnetotelluricheskikh zondirovaniy (MT, AMT, RMT). ZondMT2d. Rukovodstvo polzovatelya* [Program for two-dimensional interpretation of magnetotelluric sounding data (MT, AMT, PMT). ZondMT2d. User manual]. St. Petersburg, Zond geophysical software, 2020. 123 p.

Received: 23 June 2021.

Information about the authors

Vadim A. Davydov, Cand. Sc., senior researcher, Bulashevich Institute of Geophysics, Ural Branch of the RAS.

УДК 608.2

ПРИМЕНЕНИЕ АВТОНОМНЫХ СЕНСОРОВ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ НЕФТЕГАЗОДОБЫЧИ

Мамонова Татьяна Егоровна¹,
stepte@tpu.ru

Громаков Евгений Иванович¹,
gromakov@tpu.ru

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

Актуальность. Существенным достоинством автономных сенсоров при использовании их для автоматизации технологических процессов является отсутствие кабельных проводок. Поставщики считают, что их внедрение обеспечивает сокращение стоимости капитальных затрат на строительство объектов (в частности, за счёт экономии на кабельной продукции и материалах), снижение сроков строительно-монтажных и пусконаладочных работ, сокращение энергопотребления и снижение операционных затрат. Перспектива применения проектных решений автоматизации с использованием радио коммуникационной среды передачи данных имеет многообещающий потенциал развития. Внедрение сетевых технологий автоматического (автоматизированного) управления на основе интеллектуальных сенсорных сетей, прежде всего, позволит в ближайшей перспективе повысить эффективность добычи углеводородного сырья на труднодоступных территориях, снизит потребность в обязательном присутствии человека на технологических площадках. Все это, в свою очередь, может значительно изменить проектные решения по автоматизации объектов нефтегазодобычи.

Цель: выявление основных препятствий при использовании автономных сенсоров для автоматизации нефтегазодобычи, проведение сравнительного анализа основных производителей автономных сенсоров.

Объекты: сетевые технологии автоматического (автоматизированного) управления на основе интеллектуальных сенсорных сетей для нефтегазодобычи.

Методы: системный анализ отечественного и зарубежного рынков автономных сенсоров и сетей.

Результаты. Выполнен анализ применения автономных сенсоров и сетей на их основе. Выявлены основные преимущества применения автоматизации в нефтегазовой отрасли на основе автономных сенсоров. Показаны условия, при которых перспективно применение автономных беспроводных сенсоров на нефтегазовых объектах. В результате выполненного исследования не удалось выявить значимую экономическую эффективность автоматизации типовых технологических процессов нефтегазодобычи путем замены всей проводной автоматизации на ее беспроводной аналог. В настоящий момент времени применение автономных сенсорных сетей в области автоматических систем управления технологическими процессами для опасных производственных объектов нефтегазодобычи также ограничено, поскольку возникают трудности сертификации функциональной безопасности. Это, в частности, связано с проблемами отказобезопасности радио коммуникационной среды, а также значительной задержкой технического обслуживания в случае удаленности и труднодоступности технологических объектов управления.

Ключевые слова:

Сенсорные сети, автономные сенсоры, умное месторождение, автоматизированные системы управления, контрольно-измерительные приборы.

Введение

Как показывают исследования, отражённые в работах [1–9], сенсоры различного назначения используются на объектах нефтегазодобычи, в системах транспортировки и переработки сырья. Практика пилотных проектов позволяет считать, что реализация цифровых и интеллектуальных технологий управления активами нефтегазовой отрасли характеризуется масштабным, быстрым и эффективным возвратом вложенных в них финансовых ресурсов. В крупных компаниях имеются все необходимые условия для технологического прорыва в цифровизации отрасли путем внедрения интеллектуальных систем разработки месторождений, добычи, транспорта и переработки нефти и газа, а также внедрения ИОТ технологий. С использованием автономных контрольно-измерительных приборов и аппаратуры (КИПиА) перечисленные технологии позволяют ускорить реализацию безлюдной эксплуатации нефтегазовых объектов (НГО).

Предполагается, что с распространением автономных сенсоров, работающих от встроенного элемента питания и не требующих кабельных проводок, появ-

ляется возможность сократить стоимость капитальных затрат на строительство объектов, снизить сроки строительно-монтажных (СМР) и пусконаладочных работ (ПНР), сократить энергопотребление и снизить операционные затраты. Все это, в свою очередь, может значительно изменить проектные решения по автоматизации объектов нефтегазодобычи.

Целью данной работы является исследование перспектив проектных решений для измерительных систем в области автоматизации (интеллектуализации) технологических процессов нефтегазодобычи на основе автономных сенсоров и самоорганизующихся сенсорных сетей (WSN).

Результат анализа ориентирован на проекты строительства и модернизации производственных объектов крупной нефтегазодобывающей компании, обустройства месторождений нефти и газа, автоматизации (интеллектуализации) технологических процессов нефтегазодобычи. Автономные сенсорные устройства состоят из сенсора, процессора, батареи питания, оптического приемопередатчика или радио приемопередатчика с антенной. Возможны реализации сенсорных блоков с интегральным или разделя-

ным приёмопередатчиком. В данной работе рассматриваются радио каналные автономные сенсорные устройства и сети на их основе.

Различают следующие направления развития сенсорных сетей.

1. Сенсорные сети типа умная пыль (Smart Dust), решающие задачи измерения, сбора данных на основе радио-канальной или лазерной телекоммуникационной сети микроминиатюрных дешевых датчиков, в ряде случаев разового применения.
2. Сенсорные сети автономных измерительных приборов (WSN), решающие задачи беспроводного сбора данных о состоянии технологического процесса и его оборудования.
3. Интеллектуальные сети КИПиА, решающие задачи сбора данных на основе интеллектуальных измерительных приборов и исполнительных устройств.

Технология Smart Dust только начинает использоваться ведущими нефтегазовыми компаниями и пока находит разовые применения, в частности, при сборе информации о площадях экологического загрязнения, пожаро-распространении и др. Под интеллектуальным измерительным прибором понимается датчик со встроенным вычислительным блоком, который выполняет в реальном времени расчетные задачи, такие как: статистическая обработка данных измерений, вычисление ключевых показателей процессов производств, самовалидация измерений, автокалибровка, самодиагностика и др. Исключительной особенностью интеллектуальных датчиков является их способности самовосстанавливаться и самообучаться после возникшего сбоя (ГОСТ Р 56947-2016/ISO/IEC/IEEE 21450:2010). В зарубежной литературе датчики данного типа именуются «Smart Sensor» (из стандартов IEEE 1451).

Особенным потенциалом развития обладают автономные сенсорные сети, соответствующие требованиям ГОСТ Р ИСО МЭК 29182, сетевые структуры IOT-структуры управления производственным процессом на основе NB-Fi протокола национального стандарта ПНСТ 354-2019.

Пример структуры автономной сенсорной сети сбора данных на нефтескважине показан на рис. 1.

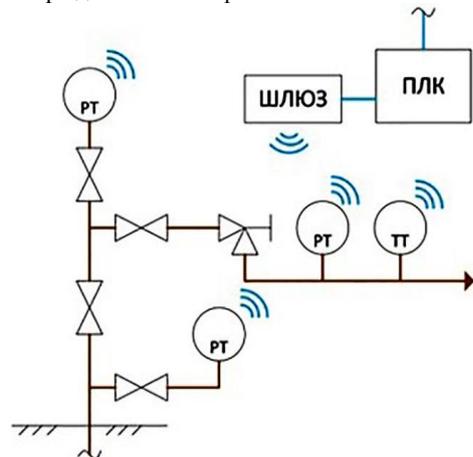


Рисунок. Автономная сенсорная сеть сбора данных на нефтескважине

Figure. Autonomous sensor network of oil well data collection

Системный анализ современных технических решений

Для сравнительного анализа технических решений, предлагаемых технологическими лидерами в области автоматизации, были выбраны следующие особенности сенсорных устройств, значимые для автоматизации технологических процессов нефтегазодобычи: характеристики полевого исполнения, типы датчиков, готовых для применения на НГО; системные особенности WSN; условия их настройки; безопасность и техническая поддержка. Для сравнительной оценки были использованы технические каталоги продукции, информация из печатных статей российских и зарубежных журналов, отражающие задел мирового научного сообщества и перечисленные в источниках литературы [10–17]. Полученные сведения отечественных компаний «СТРИЖ», «С-sensor», «СИАМ», «Сенсорика» на момент выполнения анализа показали недостаточную готовность датчиков для применения на НГО. Результаты обработки технических данных наиболее готовых автономных сенсоров для применения на НГО для наглядного отображения их ключевых технических характеристик были сведены в таблице.

При рассмотрении вопроса настройки и установки перечисленных автономных сенсоров было определено, что подготовительные работы на местности требуются для большинства из указанных марок, кроме «Emerson Rosemount», «Endress+Hauser» и «Siemens». Программное обеспечение (ПО) и оборудование для настройки контрольно-измерительных приборов многими компаниями предоставляются в комплекте бесплатно.

Был рассмотрен вопрос обеспечения и установки ПО и оборудования для настройки беспроводной сети. Здесь для каждой марки дело обстоит по-разному. В частности, для Emerson Rosemount имеется веб-интерфейс шлюза и бесплатное ПО AMS Wireless Configurator. Компания Endress+Hauser предоставляет также веб-интерфейс шлюза, ПО FieldCare платное – как опция. Фирма Honeywell: для работы беспроводной сети требуется приобретение станции управления и точек доступа, требующих внешнее питание и прокладку сетевого кабеля. Компания Yokogawa предлагает 1 лицензию на ПО Field Wireless Management Tool. Schneider Electric имеет ПО Accutech Manager. У Объединения БИНАР ПО поставляется комплектно с разрабатываемыми системами, при этом для осуществления взаимодействия со сторонними системами необходимо наличие базовой станции. Компания Siemens имеет ПО TIA PORTAL/S7.

Указанные характеристики позволяют сделать вывод о высокой степени готовности решений, предлагаемых технологическими лидерами. Технические решения включают в себя не только поставку отдельных устройств (КИПиА, преобразователи), но и предлагают программные решения для мониторинга, анализа и конфигурирования беспроводных устройств, то есть представляют собой законченные решения для применения в АСУ ТП производственных объектов нефтегазодобычи.

Таблица. Результаты обработки технических данных автономных сенсоров
Table. Self-contained sensor technical data processing results

| Сравнение характеристик Comparison of characteristics | Emerson Rosemount | Endress+Hauser | Honeywell | Yokogawa | Schneider Electric | Объединение БИНАР BINAR Merger | Siemens |
|--|--|--|---|---|---|--|--|
| Параметры беспроводной сети Wireless Network Settings | Технология (стандарт) Technology (standard) WirelessHART, Динамическая топология (mesh), 2.4 ГГц Dynamic topology (mesh), 2.4 GHz | Технология (стандарт) Technology (standard) WirelessHART, Динамическая топология (mesh), 2.4 ГГц Dynamic topology (mesh), 2.4 GHz | Стандарт ISA100.11a, статическая топология (преимущественно звезда), 2.4 ГГц ISA100.11a standard, static topology (mainly star), 2.4 GHz | Стандарт ISA100.11a, статическая топология (преимущественно звезда), 2.4 ГГц ISA100.11a standard, static topology (mainly star), 2.4 GHz | Стандарт ISA100.11a, статическая топология (преимущественно звезда), 2.4 ГГц ISA100.11a standard, static topology (mainly star), 2.4 GHz | Собственный протокол на базе стандарта IEEE 802.15.4, статическая топология (преимущественно звезда), 868 МГц/433 МГц Native protocol based on IEEE 802.15.4, static topology (mainly star), 868 MHz/433 MHz | Технология (стандарт) WirelessHART, Динамическая топология (mesh), 2.4 ГГц Technology (standard) WirelessHART, Dynamic topology (mesh), 2.4 GHz |
| Поддерживаемые протоколы, интерфейсы/Supported Protocols, Interfaces | | | | | | | |
| Modbus RTU, RS485 | Да/Yes | Да/Yes | Да/Yes | Нет/No | Да/Yes | Да/Yes | Нет/No |
| OPC | Да/Yes | Да/Yes | Да/Yes | Да, заказывается отдельно yes, ordered separately | Да/Yes | Нет/No | Нет/No |
| HART IP | Да/Yes | Да/Yes | Нет/No | Нет/No | Да/Yes | Нет/No | Нет/No |
| Modbus TCP/IP | Да/Yes | Да/Yes | Да/Yes | Да/Yes | Да/Yes | Нет/No | Нет/No |
| EtherNet-IP | Да/Yes | Да/Yes | Нет/No | Нет/No | Да/Yes | Нет/No | Да (Industrial Ethernet) Yes (Industrial Ethernet) |
| Количество приборов на 1 шлюз Number of instruments per 1 gateway | 100 (25 для модели 1410) 100 (25 for Model 1410) | 100 | не более 60 на одну точку доступа (при этом без станции управления сеть не функционирует) not more than 60 per access point (the network does not operate without a control station) | 50 | 100 (возможность создания сети из 256) 100 (networking capability of 256) | 8 приборов на каждый модуль сбора и связи 8 devices for each collection and communication module | Ограничения не указываются. Рекомендовано до 100 Restrictions are not specified. Up to 100 recommended |
| Полевые датчики/Field sensors | | | | | | | |
| Способ питания Method of power | Модуль питания Emerson Emerson Power Module | Две батареи стандартных типов/размеров Two Standard Batteries | Две батареи стандартных типов/размеров Two Standard Batteries | Две батареи стандартных типов/размеров Two Standard Batteries | Литиевый аккумулятор Lithium battery | Батарея 3.6 В ёмкостью 2.4 А/ч Battery 3.6 V capacity 2.4 Ah | Батарея 3,6 В 3.6 V battery |
| Срок службы батареи (зависит от частоты опроса) Battery life (depends on polling frequency) | До 10 лет Up to 10 years | До 10 лет Up to 10 years | До 6 лет Up to 6 years | До 10 лет Up to 10 years | До 10 лет Up to 10 years | До 10 лет Up to 10 years | До 5 лет Up to 5 years |
| Тип исполнения датчиков Type of sensor design | | | | | | | |
| Дальность передачи данных по прямой видимости Line of Sight Data Range | 200 м стандартное исполнение, 800 м приборы увеличенного радиуса 200 m standard version, 800 m devices of increased radius | 150 м датчик–датчик; 300 м шлюз–датчик 150 м sensor–sensor; 300 м gateway–sensor | 150 м датчик–датчик; 300 м шлюз–датчик 150 м sensor–sensor; 300 м gateway–sensor | 600 м датчик–датчик, 300 м шлюз–датчик 600 m sensor–sensor; 300 m gateway–sensor | 1000 м (при использовании стандартных встроенных антенн) 1000 m (using standard built-in antennas) | Удаленность датчика от модуля сбора и связи не более 100 м. Удаленность от базовой станции до 1000 м Sensor distance from collection and communication module is not more than 100 m. Distance from base station is up to 1000 m | 250/50 м в помещении 250/50 m indoors |
| Встроенный радиомодуль (КИП) Built-in radio module (instrumentation) | Да/Yes | Нет/No | Да/Yes | Да/Yes | Да/Yes | Да/Yes | Да/Yes |

| | | | | | | | | | |
|--|--|--|--|--------------------------|---|---|---|---|--------|
| Требуется дополнительная настройка маршрутов связи Additional configuration of communication routes is required | Нет/No | Нет/No | Да/Yes | Да/Yes | Да/Yes | Да/Yes | Нет/No | Да/Yes | Нет/No |
| Температура окружающей среды шлюза Lock ambient temperature | -40 до +70 -40 to +70 | -20 до +60 -20 to +60 | -10 до 65 для станции управления -40 до +75 для точки доступа -10 to 65 for control station -40 to +75 for access point | -40 до +60 -40 to +60 | -40 до +85 -40 to +85 | -50 до +50 -50 to +50 | -40 до +60 -40 to +60 | -40 до +60 -40 to +60 | Нет/No |
| Температура окружающей среды КИП Instrument ambient temperature | -60 до +85 -60 to +85 | -40 до +80 -40 to +80 | -40 до +85 -40 to +85 | -40 до +85 -40 to +85 | -40 до +85 -40 to +85 | -50 до +50 -50 to +50 | -40 до +60 -40 to +60 | -40 до +60 -40 to +60 | Нет/No |
| Стандартная гарантия в среднем на КИП Standard Instrument Average Warranty | 1 год (12 лет для 3051S Ultra) 1 year (12 years for 3051S Ultra) | 1 год/1 year | 1 год/1 year | 1 год/1 year | 36 месяцев. 36 months. Service life – 30 years | 1 год, срок службы не менее 10 лет 1 year, service life not less than 10 years | 1 год/1 year | 1 год/1 year | Нет/No |
| Безопасность/Safety | | | | | | | | | |
| IP адресация полевых приборов IP addressing of field devices | Нет/No | Нет/No | Да/Yes | Да/Yes | Да/Yes | Да/Yes | Да/Yes | Да/Yes | Нет/No |
| Поддержка/Support | | | | | | | | | |
| Русскоязычная документация Russian documentation | На всю линейку и всю документацию For the entire line and all documentation | На всю линейку и всю документацию For the entire line and all documentation | По запросу на всю линейку On request for the entire line | Да/Yes | По запросу на всю линейку On request for the entire line | На всю линейку и всю документацию For the entire line and all documentation | По запросу на всю линейку On request for the entire line | По запросу на всю линейку On request for the entire line | Нет/No |
| Перечень поддерживаемых технологических параметров/List of supported process parameters | | | | | | | | | |
| Давление/Pressure | Да/Yes | Да/Yes | Да/Yes | Да/Yes | Да/Yes | Да/Yes | Да/Yes | Да/Yes | Да/Yes |
| Температура Temperature | Да/Yes | Да/Yes | Да/Yes | Да/Yes | Да/Yes | Да/Yes | Да/Yes | Да/Yes | Да/Yes |
| Положение (штука, клапана) Position (stem, valve) | Да/Yes | Нет/No | Да/Yes | Нет/No | Да/Yes | Нет/No | Нет/No | Нет/No | Нет/No |
| Уровень/Level | Да/Yes | Да/Yes | Да/Yes | Нет/No | Да/Yes | Да/Yes | Да/Yes | Да/Yes | Нет/No |

На данный момент основными измеряемыми параметрами с помощью беспроводных сенсоров являются: давление, уровень и температура. Не все производители предлагают датчики расхода, загазованности и т. д. Вызвано это тем, что такие датчики имеют высокое энергопотребление, так как с них постоянно необходимо снимать измерения, что в значительной степени скажется на длительности работы батареи. Использование компаниями Emerson, Rosemount, Endress+Hauser большого количества стандартных сетевых протоколов позволяет обеспечивать альтернативность проектного выбора сетевых средств АСУТП. Так, несмотря на существенные достоинства протокола ISA100 (компаниями Honeywell, Yokogawa, Schneider Electric), известным его недостатком является ручная настройка сети WSN, что требует участия опытного специалиста. Выбор же открытого протокола WirelessHART позволяет реализовывать полностью самоорганизующиеся и самовосстанавливающиеся сети. Существенным при выборе этого протокола является то, что все функции безопасности программного слоя приема-передачи данных реализуются поставщиком в обязательном порядке и, следовательно, на системном уровне необходимый уровень отказобезопасности коммуникационной среды выполняется также в обязательном порядке.

Протокол NB-Fi национального стандарта РФ беспроводной передачи данных на основе узкополосной модуляции радиосигнала обеспечивает отечественным разработчикам сенсорных сетей конкурентоспособность внедрения отечественных сенсорных сетей благодаря заявляемой низкой стоимости радиопередатчиков для устройств и возможность их производства в России. Протокол NB-Fi, относящийся к технологии LPWAN (энергоэффективная сеть дальнего радиуса действия), позволяет реализовывать сеть с устойчивой передачей данных на расстоянии до 10 км в условиях присутствия препятствий и до 30 км в случае их отсутствия. Однако на настоящий момент неизвестна сертификация его отказобезопасности.

Протокол WirelessHART использует четыре верхние уровня сетевой модели OSI. Он обладает существенными преимуществами по сравнению с другими протоколами радиосвязи ограниченной мощности, обеспечивая надежную эксплуатацию приемопередающих каналов связи.

Важным достоинством его применения является то, что существующие проводные HART-приборы можно оснастить беспроводными модулями передачи данных, позволяющими интегрировать проводные HART-устройства в беспроводную сеть. Тем самым обеспечивается единый доступ к проводным и беспроводным приборам через беспроводный шлюз сбора данных. Благодаря использованию единого прикладного уровня в модели OSI (ISA100) все поддерживающие его HART-приборы оказываются взаимно совместимыми, что позволяет выполнять по единому алгоритму калибровку, настройку и диагностику приборов. Это особенно важно, так как миллионы проводных средств автоматизации по всему миру работают с использованием протокола HART.

Преимуществом стандарта ISA100.11a является то, что устанавливаемые временные интервалы связи имеют возможность on-line конфигурирования. Это позволяет поддерживать три основных режима работы каналов связи: скачкообразное изменение частоты между каналами, медленное изменение частоты от канала к каналу и гибридная перенастройка частоты. Для расширения возможности перенастройки частоты с использованием методов DSSS и FHSS находит применение технология CCA (Clear Channel Assessment), короткого времени передачи и функции занесения в «черный список» [18]. Благодаря такой гибкости в сенсорной сети могут обслуживаться одновременно как приборы, которые передают данные периодически или спорадически с основным временем в выключенном состоянии, так и приборы, которые требуют синхронизации по времени. Такой режим работы не требует синхронизации сетевых узлов по времени и позволяет обеспечивать высокую надежность коммуникации без дополнительных затрат энергии батареи [19].

Применение WSN в системах противоаварийной защиты НГО существенно зависит от отказобезопасности коммуникационной среды. Несмотря на то, что функциональная отказобезопасность программного слоя подготовки и передачи данных сертифицируется за счет применения стандартного профиля PROFIsafe, который осуществляет контроль времени, контроль нумерации кодовых посылок, контроль подписи сообщений и дополнительный контроль целостности данных, для обеспечения заявляемой SIL этого недостаточно. Электромагнитные помехи и физические препятствия распространения радиоволн ограничивают применимость WSN в СПАЗ. Дополнительным ограничением СПАЗ на безлюдных объектах НГО является существенное время недоступности (DTU) обслуживания (например, при замене батареи или техническом обслуживании отдельного модуля) из-за удаленности и труднодоступности НГО. Большинство предлагаемых технических решений на основе применения автономных сенсоров базируется на использовании не лицензируемых радиочастот 2,4 ГГц/434 МГц/868 МГц. Основное различие между данными ISM-диапазонами определяется частотой излучения и, как следствие, свойствами радиоволн. Наиболее «спокойным» относительно помех на текущий момент представляется диапазон 868 МГц, потому что безлицензионным в РФ он стал относительно недавно по решению ГКРЧ № 18-46-03-1 от 11 сентября 2018 г. [20]. Этот диапазон частот пока «не загружен» применением. Кроме того, по сравнению с СВЧ диапазоном более длинные волны (868 МГц) имеют меньшую интенсивность затухания и тем самым обеспечивается большая дальность передачи с увеличением «проницаемости» сигналов сквозь преграды. Поэтому применительно к задаче сбора данных средствами беспроводного управления и контроля наиболее оптимальным решением в настоящее время является использование диапазона 868 МГц.

Однако, несмотря на технические преимущества при передаче данных с частотой радиоволн 868 МГц,

многие производители промышленных сетей с радиочастотной телекоммуникацией применяют в своих решениях частоту 2,4 ГГц, которая позволяет использовать более компактные и менее энергоемкие передатчики [21].

Низкотемпературное исполнение устройств сенсорных сетей в линейке сенсорных устройств компании Emerson позволяет использовать беспроводные приборы без дополнительного обогрева. В других исполнениях для повышения окружающей температуры сенсорного узла применяются специальные необогреваемые чехлы. Однако в условиях крайнего севера (при температурах ниже $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$) применение автономных сенсоров ограничивается условиями применимости электроники радиопередающих модулей датчиков. Самые низкие температурные показатели имеет оборудование КИПиА в линейке компании Emerson ($-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ для датчика давления Rosemount 3051S, $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ для датчика температуры Rosemount 648; $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ для датчика уровня Rosemount 3308), что позволяет использовать беспроводные приборы без дополнительного обогрева в районах с суровым климатом. Поэтому их применение оправдано для районов, климатически неблагоприятных для применения автономных сенсоров.

Согласно ГОСТ Р ИСО/МЭК 29182-1-2018, сенсорные сети могут иметь статическую топологию или динамически реконфигурироваться путем добавления или удаления сенсорных узлов. Таким образом, может поддерживаться динамическая топология сенсорной сети. Самоорганизация и самовосстановление являются атрибутами беспроводных сенсорных сетей и тесно связаны с динамической сетевой топологией. Самоорганизация сенсорной сети – это ее способность формировать новый сетевой граф телекоммуникации без необходимости вмешательства человека. Сетевой граф устанавливает, с какими сенсорными узлами связывается данный сенсорный узел. С другой стороны, самовосстановление – это способность сети восстанавливаться после сбоев сенсорных узлов или каналов связи. После того, как сеть самоорганизуется или восстановится, в ней могут быть налажены необходимые связи, и сенсорная сеть может выполнять свою функцию на приемлемом уровне [22]. У компании Yokogawa самоорганизация сенсорной сети обеспечена на уровне связи устройств сбора данных [15, 16].

Такие компании, как Emerson, Endress+Hauser, Siemens, для самоорганизации сети используют в своих решениях динамическую топологию (Mesh) [11]. Эта способность позволяет любому узлу сети выполнять функции передачи пакетов данных с другим участникам сети путем их ретрансляции, что в ряде применений улучшает стабильность передачи данных. Динамическая топология сети значительно упрощает процесс планирования сети, повышает надежность сети, т. к. каждый узел сети может выполнять функции ретранслятора и таким образом может служить коммутатором для соседних узлов. Такая топология сети обеспечивает надежную передачу данных, отлично масштабируется и обеспечивает са-

морезервирование, поскольку возможно различное перенаправление данных от одного узла к точке назначения, минуя неисправные (недостижимые) узлы. Однако, в сравнении со статической топологией, для ее реализации требуется заметно больше энергетических затрат, что значительно уменьшает срок службы элементов питания. Поэтому на практике такое решение ограничено в применении.

Самой распространенной сетевой топологией соединения сенсоров, предлагаемых ведущими компаниями в настоящее время, является «звезда» с одним центральным или маршрутизирующим узлом. Все конечные узлы такой звезды выполняют только одну функцию – передачу данных центральному узлу. С использованием топологии «звезда» отказ какого-либо конечного устройства не ведет к отказу сети, так как каждое конечное устройство связано только с центральным узлом. Достоинством такой топологии является меньшее потребление энергии, так как после отправки данных в соответствии с установленными алгоритмами передачи данных они возвращаются в спящий режим.

При использовании сенсорных сетей в АСУТП необходимо учитывать временные ограничения работы полевого оборудования, так как датчики осуществляют измерение и передачу значений с дискретизацией от 1 (0,5 сек у Honeywell) до 60 сек. Во время, отличное от измерения и передачи данных, для снижения энергопотребления прибор автоматически переводится в режим «Сон». Такая особенность технологии автономных сенсоров накладывает ограничения в сферах применения в АСУТП нефтегазодобычи, в частности, в системах противоаварийной защиты (СПАЗ), на узлах коммерческого учета быстроменяющихся технологических процессов, в замкнутых контурах управления.

При проектом выборе автономных сенсоров необходимо учитывать особенности рельефа (особенно если автоматизация охватывает удаленные друг от друга НГО), так как радиусы устойчивой работы устройств связи и оборудования могут значительно снизить область охвата автоматизацией объектов управления. В настоящее время существует проблема с прохождением сигнала через листву деревьев, так как падает дальность передачи данных. Можно ожидать, что совершенствование антенн может решить эту проблему. Так, компанией Emerson предлагается применение удлиненных антенн, что позволяет значительно расширить область охвата сенсорной сетью района нефтегазодобычи. Использование комплексов коммуникационного оборудования (до 5 ретрансляторов) также позволяет достигать расширения сети до 25 км. Компания Honeywell предлагает решения по использованию всенаправленных и остронаправленных внешних антенн. Возможна совместимость с производителями коммуникационного оборудования других фирм с поддержкой протокола ISA100.11a, что делает применение решений производителя более гибкими [23, 24].

Однако нельзя быть полностью уверенным в том, что радио каналные устройства могут быть доста-

точно надежными и безопасными: распространение сигнала радиоволн может быть нарушено как природными, так техногенными причинами. Известна практика пилотных проектов беспроводных сенсоров на объектах добычи углеводородов компаний ОАО «Томскгазпром», ОАО «Лукойл-Коми», АО Самара-нефтегаз, АО «Транснефть» и др. Так, в проектах БСС ОАО «Томскгазпром» в 2012 г. для автоматизации новых газовых и нефтяных скважин использовались:

- автономные датчики давления 3051S для измерения линейного давления, затрубного давления, буферного давления нефтяных и газовых скважин;
- автономные датчики температуры 648 для измерения температуры после штуцера газовых скважин;
- шлюз 1420 для сбора данных сенсорных датчиков.

Датчики, оборудованные термочехлами без обогрева, были установлены непосредственно на оборудовании устья скважины через вентильные блоки или защитные гильзы. WSN оборудование было установлено на месторождениях Мыльджинское, Северо-Васюганское, Болтное, Казанское, Северо-Останинское. Минимальная температура за две зимы эксплуатации составила -43°C .

Согласно отзывам ОАО «Томскгазпром», беспроводные датчики зарекомендовали себя как высоконадежные средства автоматизации. Сбоев не наблюдалось, влияния температурных пиков замечено не было. Отмечается легкость и удобство монтажа и эксплуатации беспроводных датчиков.

Проанализировав практики применения беспроводных сенсоров, можно сделать вывод, что применение WSN на объектах нефте- и газодобычи перспективно.

Однако при прямом сравнении капитальных вложений ни одна из рассматриваемых беспроводных измерительных систем не показала достаточной экономической эффективности по сравнению с проводным аналогом для достижения окупаемости в рамках прямой замены проводной системы на беспроводную. Следует иметь в виду, что эстакады на месторождениях устанавливаются не только для кабельных проводов передачи данных. Дополнительные способы достижения экономии на капитальных затратах WSN выявлены не были, однако существует возможность экономии на операционных затратах, в частности, связанных с ремонтом скважин.

Таким образом, в настоящее время беспроводные измерительные системы пока не могут быть рекомендованы для замены проводных аналогов. Нет экономической целесообразности реконструкции существующих объектов с их использованием в рамках проектов, в которых возникает необходимость вос-

становления ветхих кабельных эстакад либо строительство новых эстакад.

Заключение

Выполненный анализ перспектив применения автономных сенсоров и сетей на их основе показал, что основными преимуществами применения автоматизации в нефтегазовой отрасли на основе автономных сенсоров являются:

- отсутствие необходимости в прокладке кабельных каналов передачи данных;
- отсутствие необходимости выполнения комплексного инструментального контроля для установки/модернизации кабельных эстакад; в некоторых случаях это ведет к отказу в использовании затратных эстакадных конструкций кабельных проводов, что снижает стоимость работ по автоматизации протяженных объектов управления;
- значительное снижение объема инжиниринговых работ при обследовании объектов управления;
- снижение времени на проектирование систем.

Развертывание беспроводной сенсорной сети требует меньших трудовых и временных затрат, что может стать важным фактором в труднодоступных местах добычи углеводородов.

Однако на данный момент их применение ограничено из-за установленных отраслевых нормативов в области АСУТП для опасных производственных объектов нефтегазодобычи. Это, в частности, связано с проблемами отказобезопасности беспроводной среды передачи данных, значительной задержкой технического обслуживания в случае удаленности и труднодоступности технологических объектов управления.

В результате выполненного исследования хотя и не удалось выявить значимую экономическую эффективность замены проводных каналов связи на их беспроводной аналог, тем не менее можно ожидать, что в результате совершенствования беспроводных сенсоров их применение окажется экономически выгодным.

В настоящее время использование автономных беспроводных сенсоров будет целесообразным, если:

- существует необходимость быстрого монтажа или демонтажа контрольного оборудования;
- есть потребность в использовании мобильного измерительного комплекса (например, для мониторинга температуры и давления при пропарке резервуаров или давления и загазованности при работе на магистральных трубопроводах);
- существует необходимость оперативного увеличения количества точек измерения в сжатые сроки;
- есть необходимость скорейшего восстановления работы технологического процесса (например, после пожара, после аварийной ситуации).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Mutiu Adesina Adegboye, Wai-Keung Fung, Aditya Karnik. Recent advances in pipeline monitoring and oil leakage detection technologies: principles and approaches // *Sensors*. – 2019. – V. 19. – № 2548. – P. 1–36.
2. Развитие перспективной автоматизации в нефтегазовой отрасли / Е.И. Громаков, Т.Е. Мамонова, А.В. Лиепиньш, А.Н. Рымшин // *Нефтяное хозяйство*. – 2019. – № 10. – С. 98–102.
3. Мамонова Т.Е. Определение кратковременных утечек в нефтепродуктопроводах // *Нефтяное хозяйство*. – 2014. – № 4. – С. 96–99.

4. Мамонова Т.Е. Гидродинамические модели в задачах определения утечек из нефтепродуктопроводов // Нефтяное хозяйство. – 2015. – № 4. – С. 92–95.
5. Mamonova T.E., Vasilyeva T.N. Artificial intelligence in problems of leak definition from the oil pipeline // Proceedings of 2014 International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems, MEACS 2014. – P. 6986846
6. Mamonova T.E. oil product loss identification per pressure variations in time at four controlled pipe cross-sections // Automation and Remote Control. – 2020. – V. 81. – № 1. – P. 192–198.
7. A three-dimensional finite element analysis of the temperature field during laser melting of metal powders in additive layer manufacturing / I.A. Roberts, C.J. Wang, R. Esterlein, M. Standford, D. Manors // International Journal of Machine Tools and Manu-facture. – 2009. – V. 49. – № 12. – P. 16–23.
8. Research on evaluation method of wellbore hydrate blocking degree during deepwater gas well testing / Wenyuan Liua, Jinqiu Hu, Xiangfang Li, Fengrui Sun, Zheng Sun, Yunjian Zhou // Journal of Natural Gas Science and Engineering. – 2018. – № 59. – P. 168–182.
9. Pipeline leakage localization based on distributed FBG hoop strain measurements and support vector machine / Z. Jia, Z. Wang, W. Sun, Z. Li // Optik. – 2019. – № 176. – P. 1–13.
10. Bernstein J., Macias D. Engineering new-product success. The new-product pricing process at Emerson. The new-product pricing process is the foundation for a set of key marketing activities // Industrial Marketing Management. – 2002. – № 31. – P. 51–64.
11. A novel MAC proposal for critical and emergency communications in Industrial Wireless Sensor Networks / Mohsin Raza, Hoa Le-minh, Nauman Aslam, Sajjad Hussain // Computers and Electrical Engineering. – 2018. – № 72. – P. 976–989.
12. Application of wireless technology for control: a WirelessHART perspective / Sabo Miya Hassan, Rosdiazli Ibrahim, Kishore Bingi, Tran Duc Chung, Nordin Saad // 2016 IEEE International Symposium on Robotics and Intelligent Sensors, IRIS 2016. – Tokyo, Japan, 17–20 December 2016, Procedia Computer Science. – 2017 – № 105. – P. 240 – 247.
13. Accutech. Автономные беспроводные измерительные устройства / Shneider Electric. 2013. – 12 с. URL: https://trss.pro/catalog/Accutech/doc/Accutech_brochure.pdf (дата обращения: 22.06.2021).
14. Machine learning for wireless communications in the Internet of Things: A comprehensive survey / J. Jagannath, N. Polosky, A. Jagannath, F. Restuccia, T. Melodia // Ad Hoc Networks. – 2019. – № 93. – P. 101913.
15. Беспроводные контрольно-измерительные приборы / Yokogawa Electric Corporation. Field Instruments BU, December, 2010. 34 с. URL: http://yoko.kip-postavka.ru/GS/Wireless_ISA100ru.pdf (дата обращения: 22.06.2021).
16. Siemens. Increasing transparency and flexibility at the field level // Siemens AG, 2012. – 14 p. URL: <https://www.siemens-pro.ru/docs/kip/common/Broshures/E20001-A960-P710-X-7600.pdf> (дата обращения: 26.04.2021).
17. Energy consumption analysis of WirelessHART adaptor for industrial wireless sensor actuator network / Tran Duc Chung, Rosdiazli Ibrahim, Vijanth Sagayan Asirvadam, Nordin Saad, Sado Miya Hassan // 2016 IEEE International Symposium on Robotics and Intelligent Sensors, IRIS 2016. – Tokyo, Japan, 17–20 December 2016, Procedia Computer Science. – 2017 – № 105. – P. 227–234.
18. Industrial wireless automation: overview and evolution of WIA-PA / Y. das Neves Validao, G. Kunzel, I. Muller, C.E. Pereira // IFAC PapersOnLine. – 2018. – V. 51. – № 10. – P. 175–180.
19. Rehman K., Nawaz F. Remote pipeline monitoring using Wireless Sensor Networks // Proc. of the International Conference on Communication, Computing and Digital Systems (C-CODE). – Islamabad, Pakistan, 8–9 March 2017; IEEE: Piscataway, NJ, USA, 2017. – P. 32–37.
20. Магические 2.4 ГГц., 2011. URL: <http://wmusers.ru/2011/06/29/magicheskie-2-4-ggc/> (дата обращения: 22.06.2021).
21. Датчик-газоанализатор стационарный ДГС ЭРИС-210 Модификация 1 Руководство по эксплуатации, 2018. – 42 с. URL: <https://eris.nt-rt.ru/images/manuals/dgs210.pdf> (дата обращения: 26.06.2021)
22. Каталог оборудования компании Yokogawa, 2016. – 27 с. URL: http://www.yokogawa.ru/products/kip/wireless_solutions/ (дата обращения: 26.06.2021).
23. Бражук А. Построение беспроводных локальных сетей на основе ячеистой топологии // Технологии и стандарты. Беспроводные технологии. – 2006. – № 4. – С 24–25. URL: <https://wireless-e.ru/wireless-networks/mesh/> (дата обращения: 26.06.2021).
24. Leitao P., Colombo A.W., Karnouskos S. Industrial automation based on cyber-physical systems technologies: Prototype implementations and challenges // Computers in Industry. – 2016. – V. 81. – P. 11–25.

Поступила 25.07.2021 г.

Информация об авторах

Мамонова Т.Е., кандидат технических наук, доцент отделения автоматизации и робототехники Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Громаков Е.И., кандидат технических наук, доцент отделения автоматизации и робототехники Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 608.2

AUTONOMOUS SENSORS USING FOR AUTOMATION OF OIL AND GAS PRODUCTION

Tatiana E. Mamonova¹,
stepte@tpu.ru

Evgeniy I. Gromakov¹,
gromakov@tpu.ru

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

The relevance. The essential advantage of autonomous sensors when used to automate technological processes is the cabling absence. Suppliers believe that their implementation provides decline of capital costs for construction of projects (in particular, due to savings on cable products and materials), reduction of construction, installation and commissioning work time, energy consumption and operating costs reduction. The application prospect of design decisions automation using the radio and communication environment for data production had a promising potential for development. The introduction of network-centric technologies of automatic (automated) control on the basis of intelligent sensor networks, first of all, will allow increasing the efficiency of hydrocarbon raw materials extraction in the short term in hard-to-reach territories, will reduce the need for mandatory man presence at technological sites. All this, in its turn, can significantly change the design decisions for automation of oil and gas production objects.

The main aim of the research is identification of the main obstacles when using autonomous sensors for automation of oil and gas production, comparative analysis of the main manufacturers of autonomous sensors.

Objects: the network-centric technologies of automatic (automated) control based on intelligent sensor networks for oil and gas production.

Methods: system analysis of domestic and foreign markets of autonomous sensors and networks.

Results. The authors have analyzed the use of autonomous sensors and networks based on them and identified the main advantages of using automation in the oil and gas industry based on autonomous sensors. The paper demonstrated the conditions under which the use of autonomous wireless sensors at oil and gas facilities is promising. As a result of the study, it was not possible to identify significant economic efficiency of automation of typical oil and gas production processes by replacing all wired automation with its wireless analogue. Currently, the use of autonomous sensor networks in the field of automatic process control systems for hazardous oil and gas production facilities is also limited, as there are difficulties in certifying functional safety. This, in particular, is due to the problems with the failure safety of the radio communication environment, as well as a significant delay in maintenance in case of remote and inaccessible technological control facilities.

Key words:

WSN, wireless sensor, smart fields, distributed control system, instrumentation

REFERENCES

- Muti Adegboye, Wai-Keung Fung and Aditya Karnik. Recent advances in pipeline monitoring and oil leakage detection technologies: principles and approaches. *Sensors*, 2019, vol. 19, no. 2548, pp. 1–36.
- Gromakov E.I., Mamonova T.E., Liepinsh A.V., Rymshin A.N. Development of perspective automation in the oil and gas industry. *Bulletin of the Oil Industry*, 2019, no. 10, pp. 98–102. In Rus.
- Mamonova T.E. Definition of short-term leakage in product pipelines. *Bulletin of the Oil Industry*, 2014, no. 4, pp. 96–99. In Rus.
- Mamonova T.E. Using the hydrodynamic models in problems of leaks definition from oil pipelines. *Bulletin of the Oil Industry*, 2015, no. 4, pp. 92–95. In Rus.
- Mamonova T.E., Vasilyeva T.N. Artificial intelligence in problems of leak definition from the oil pipeline. *Proceedings of 2014 International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems, MEACS 2014*. pp. 6986846.
- Mamonova T.E. oil product loss identification per pressure variations in time at four controlled pipe cross-sections. *Automation and Remote Control*, 2020, vol. 81, no. 1, pp. 192–198.
- Roberts I.A., Wang C.J., Esterlein R., Standford M., Manors D. A three-dimensional finite element analysis of the temperature field during laser melting of metal powders in additive layer manufacturing. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2009, vol. 49, no. 12, pp. 16–23.
- Wenyuan Liua, Jinqiu Hu, Xiangfang Li, Fengrui Sun, Zheng Sun, Yunjian Zhou. Research on evaluation method of wellbore hydrate blocking degree during deepwater gas well testing. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2018, no. 59, pp. 168–182.
- Jia Z., Wang Z., Sun, W., Li Z. Pipeline leakage localization based on distributed FBG hoop strain measurements and support vector machine. *Optik*, 2019, no. 176, pp. 1–13.
- Bernstein J., Macias D. Engineering new-product success. The new-product pricing process at Emerson. The new-product pricing process is the foundation for a set of key marketing activities. *Industrial Marketing Management*, 2002, no. 31, pp. 51–64.
- Mohsin Raza, Hoa Le-minh, Nauman Aslam, Sajjad Hussain. A novel MAC proposal for critical and emergency communications in Industrial Wireless Sensor Networks. *Computers and Electrical Engineering*, 2018, no. 72, pp. 976–989.
- Sabo Miya Hassan, Rosdiazli Ibrahim, Kishore Bingi, Tran Duc Chung, Nordin Saad. Application of wireless technology for control: a WirelessHART perspective. *2016 IEEE International Symposium on Robotics and Intelligent Sensors, IRIS 2016*. Tokyo, Japan, 17–20 December 2016, *Procedia Computer Science*, 2017, no. 105, pp. 240–247.
- Accutech. Avtonomnye besprovodnye izmeritelnye ustroystva [Accutech. Self-contained wireless measuring devices]. Available at: https://trss.pro/catalog/Accutech/doc/Accutech_brochure.pdf (accessed 22 July 2021).
- Jagannath J., Polosky N., Jagannath A., Restuccia F., Melodia T. Machine learning for wireless communications in the Internet of Things: a comprehensive survey. *Ad Hoc Networks*, 2019, no. 93, pp. 101913.
- Besprovodnye kontrolno-izmeritelnye pribory [Wireless instrumentation]. *Yokogawa Electric Corporation. Field Instruments BU*. December, 2010. 34 p. Available at: http://yoko.kip-postavka.ru/GS/Wireless_ISA100ru.pdf (accessed 22 July 2021).
- Siemens. Increasing transparency and flexibility at the field level. *Siemens AG*, 2012. 14 p. Available at: <https://www.siemens-pro.ru/docs/kip/common/Broschures/E20001-A960-P710-X-7600.pdf> (accessed 22 July 2021).
- Tran Duc Chung, Rosdiazli Ibrahim, Vijanth Sagayan Asirvadam, Nordin Saad, Sado Miya Hassan. Energy consumption analysis of WirelessHART adaptor for industrial wireless sensor actuator

- network. *2016 IEEE International Symposium on Robotics and Intelligent Sensors, IRIS 2016*. Tokyo, Japan, 17–20 December 2016, *Procedia Computer Science*, 2017, no. 105, pp. 227–234.
18. Das Neves Validao Y., Kunzel G., Muller I., Pereira C.E. Industrial wireless automation: overview and evolution of WIA-PA. *IFAC PapersOnLine*, 2018, vol. 51, no. 10, pp. 175–180.
 19. Rehman K., Nawaz F. Remote pipeline monitoring using Wireless Sensor Networks. *Proceedings of the International Conference on Communication, Computing and Digital Systems (C-CODE)*. Islamabad, Pakistan, 8–9 March 2017. IEEE: Piscataway, NJ, USA, 2017. pp. 32–37.
 20. *Magicheskie 2.4 GGz 2011* [Magic 2.4 GHz. 2011]. Available at: <http://wmusers.ru/2011/06/29/magicheskie-2-4-ggz/> (accessed 26 June 2021).
 21. *Datchik-gazoanalizator spetsialniy DGS ERIS-210. Modifikatsiya 1. Rukovodstvo po ekspluatatsii* [Sensor-gas analyzer stationary DGS ERIS-210. Modification 1. Operation Manual]. 2018. 42 p. Available at: <https://eris.nt-rt.ru/images/manuals/dgs210.pdf> (accessed 26 June 2021).
 22. *Katalog oborudovaniya kompanii Yokogawa* [Yokogawa Equipment Catalog]. 2016. 27 p. Available at: http://www.yokogawa.ru/products/kip/wireless_solutions/ (accessed 26 June 2021).
 23. Braguk A. Postroenie besprovodnykh lokalnykh setey na osnove yacheistoy topologii [Building wireless LANs based on mesh topology]. *Tekhnologii i standarty. Besprovodnye tekhnologii*, 2006, no 4, pp. 24–25. Available at: <https://wireless-e.ru/wireless-networks/mesh/> (accessed 26 June 2021).
 24. Leitao P., Colombo A.W., Karnouskos S. Industrial automation based on cyber-physical systems technologies: prototype implementations and challenges. *Computers in Industry*, 2016, vol. 81, pp. 11–25.

Received: 25 July 2021.

Information about the authors

Tatiana E. Mamonova, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Evgeniy I. Gromakov, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 550.834.05

СТАТИСТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА АТРИБУТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ ПРОГНОЗЕ ДОЮРСКИХ КОЛЛЕКТОРОВ ПО ДАННЫМ СЕЙСМОРАЗВЕДКИ

Чучалина Кристина Юрьевна¹,
K.Yu.Chuchalina@gmail.com

Волкова Александра Александровна¹,
VolkovaAA@hw.tpu.ru

Меркулов Виталий Павлович¹

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

Актуальность исследования обусловлена необходимостью увеличения степени достоверной оценки геологического строения сложнопостроенных коллекторов при наличии малого набора геолого-геофизической информации, что представляет неоднозначность в прогнозировании и выделении геологических объектов. В последние десятилетия компании широко применяют различные классификационные алгоритмы в процессе обработки всего комплекса данных для уменьшения неопределенностей геологической интерпретации. Одним из подходов является применение классификационных методов к сейсмическому сигналу, которые разделяют исследуемый объект на однородные по ряду признаков области, где также совместно используют данные геофизических исследований скважин и лабораторных исследований керна, что подразумевает комплексирование информации. Комплексная интерпретация сейсмических и скважинных данных позволяет прогнозировать на качественном уровне литофациальную изменчивость на локальных участках, что способствует более рациональному размещению эксплуатационных скважин.

Цель исследования заключается в рассмотрении подходов анализа достоверной оценки и прогноза фациального строения при поиске перспективных объектов для наиболее оптимального расположения эксплуатационных скважин при планировании бурения, с учетом постоянно пополняемой и обновляемой геологической информации о пласте.

Объектом исследования являются отложения палеозойского фундамента юго-восточной части Западно-Сибирской плиты, которые представляют породы различного вещественного состава, включая карбонатные разности.

Методы исследования включают статистический анализ сейсмической информации и геолого-геофизических данных. В результате исследования выполнен статистический анализ пространственного изменения фациальной обстановки, на основе которого выделены достоверные зоны наличия определенной фации. Предложенная стратегия прогнозирования перспектив нефтегазоносности палеозойских отложений на примере одного из месторождений Западной Сибири способствовала выделению перспективных зон для будущего планирования расположения скважин.

Ключевые слова:

Сейсмофациальный анализ, сейсмофациальная карта, геофизические исследования скважин, акустический импеданс, лабораторные исследования керна, палеозойские отложения.

Введение

В последние десятилетия установлено, что доля углеводородов, сосредоточенных в карбонатных коллекторах, играет чрезвычайно важную роль в мировом энергетическом балансе [1–4]. Стоит отметить, что в России запасы нефти, приуроченные к карбонатным отложениям, составляют более 50 % от всех запасов, что благоприятно влияет на актуальность изучения особенностей геологического строения таких объектов [5, 6]. Независимо от того, что существует высокая вероятность обнаружения залежей углеводородов, возникают трудности в процессе прогноза формы, размера, расположения перспективных геологических тел из-за сложного складчатоблокового строения палеозойского комплекса Западной Сибири.

Рассматриваемое месторождение расположено в юго-восточной части Западно-Сибирской плиты, изучаемые продуктивные отложения доюрского комплекса характеризуются крайне неоднородным вертикальным строением, где встречаются породы различного вещественного состава – глинисто-

кремнистые породы, образования магматических и вулканогенно-осадочных пород, отложения коры выветривания, песчаники, а также карбонатные разности доломита и известняка. Необходимо отметить, что отложения палеозойского фундамента изучаемого месторождения представляют порово-каверново-трещинный тип коллектора, что осложняет процесс интерпретации и требует комплексирования геолого-геофизических данных [7].

Методика проведения фациального анализа с помощью геофизических исследований

Литолого-фациальный прогноз является основой для воссоздания трехмерного распределения пород-коллекторов в изучаемом интервале продуктивного пласта. Для получения реалистичного распределения литотипов на изучаемой территории была предложена методика сопоставления акустического импеданса, полученного из скважинных данных, а именно из данных геофизических исследований скважин и лабораторных методов исследования керна. Сопоставление такого комплекса информации подразумевает

получение акустического импеданса расчетным методом, используя формулу ниже:

$$AI = V_p * \rho, \quad (1)$$

где AI – акустический импеданс, $\text{кг/м}^3 \cdot \text{м/с}$; V_p – скорость продольной волны, м/с ; ρ – плотность горной породы, г/см^3 .

Для расчета акустического импеданса был использован комплекс ГИС (геофизические исследования скважин), но необходимо отметить, что более чем в 50 % фонда скважин отсутствуют измерения акустического каротажа, кроме этого, полностью отсутствуют исследования плотности горных пород, что не позволяет напрямую определить акустические свойства пласта.

Для восстановления значений плотности горных пород в исследуемом интервале по данным ГИС были рассмотрены несколько вариантов: зависимость между АК (акустический каротаж) и ГГК-П (плотностной гамма-гамма-каротаж), где исследования были проведены в горизонтальном стволе эксплуатационной скважины; зависимость между ГК (гамма каротаж) и значениями плотности горных пород из лабораторных исследований эксплуатационной скважины; зависимость альфа-ПС для горизонтальной эксплуатационной скважины в вертикальной части ствола относительно значений плотности горной породы по лабораторным исследованиям керна этой же скважины.

В табл. 1 представлен диапазон значений плотности пород для трех кейсов и среднее значение для всего интервала. Принимая во внимание среднее значение и диапазон минимального и максимального значений, необходимо отметить, что предложенные варианты расчетов недостоверно отображают значения плотности для изучаемых отложений. Расчетный диапазон был сопоставлен с опубликованными данными, где диапазон значений для известняков равен $2,37\text{--}2,77 \text{ г/см}^3$, а для доломитов – $2,84\text{--}2,86 \text{ г/см}^3$ [8].

Таблица 1. Варианты расчетных значений плотности горных пород по данным ГИС

Table 1. Options for calculated values of the density of rocks according to well logging

| Кейс/Case | Диапазон значений, г/см^3 Range of values, g/cm^3 | Среднее значение плотности, г/см^3 Average density, g/cm^3 |
|------------------|--|---|
| Первый/First | 2,46–2,76 | 2,70 |
| Второй/Second | 2,56–2,77 | 2,66 |
| Третий/Third | 2,71–2,75 | 2,73 |
| Четвертый/Fourth | 2,64–2,88 | 2,74 |

Таким образом, был рассмотрен еще один вариант зависимости между акустическим каротажем в вертикальной эксплуатационной скважине и значениями плотности горных пород из лабораторных исследований эксплуатационной скважины (рис. 1).

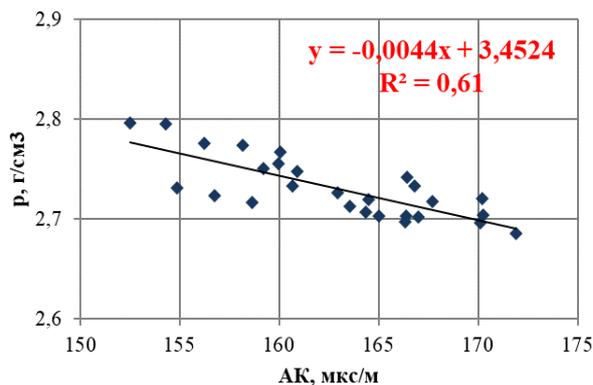


Рис. 1. Зависимость акустического каротажа от плотности горной породы по керну

Fig. 1. Dependence of acoustic logging on core density

С целью оценки корректности полученных значений был проведен сравнительный анализ, где было отмечено, что полученные данные с помощью последнего кейса характеризуют наиболее приближенные результаты к опубликованным статистическим значениям [8], а также представляют хорошее сопоставление ГИС–керна (рис. 2).

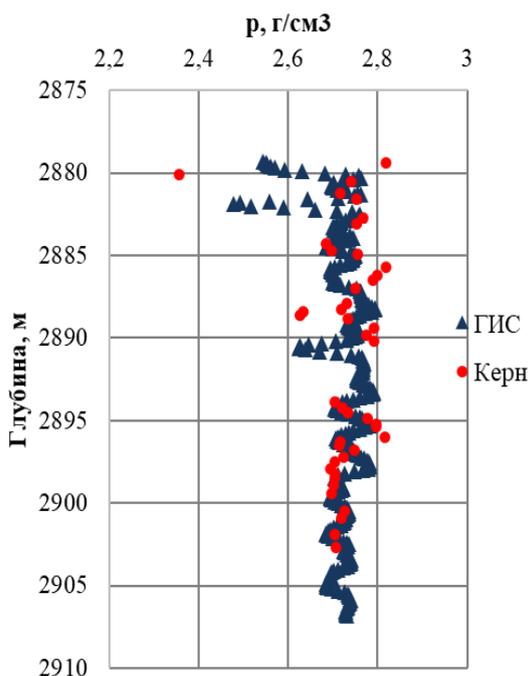
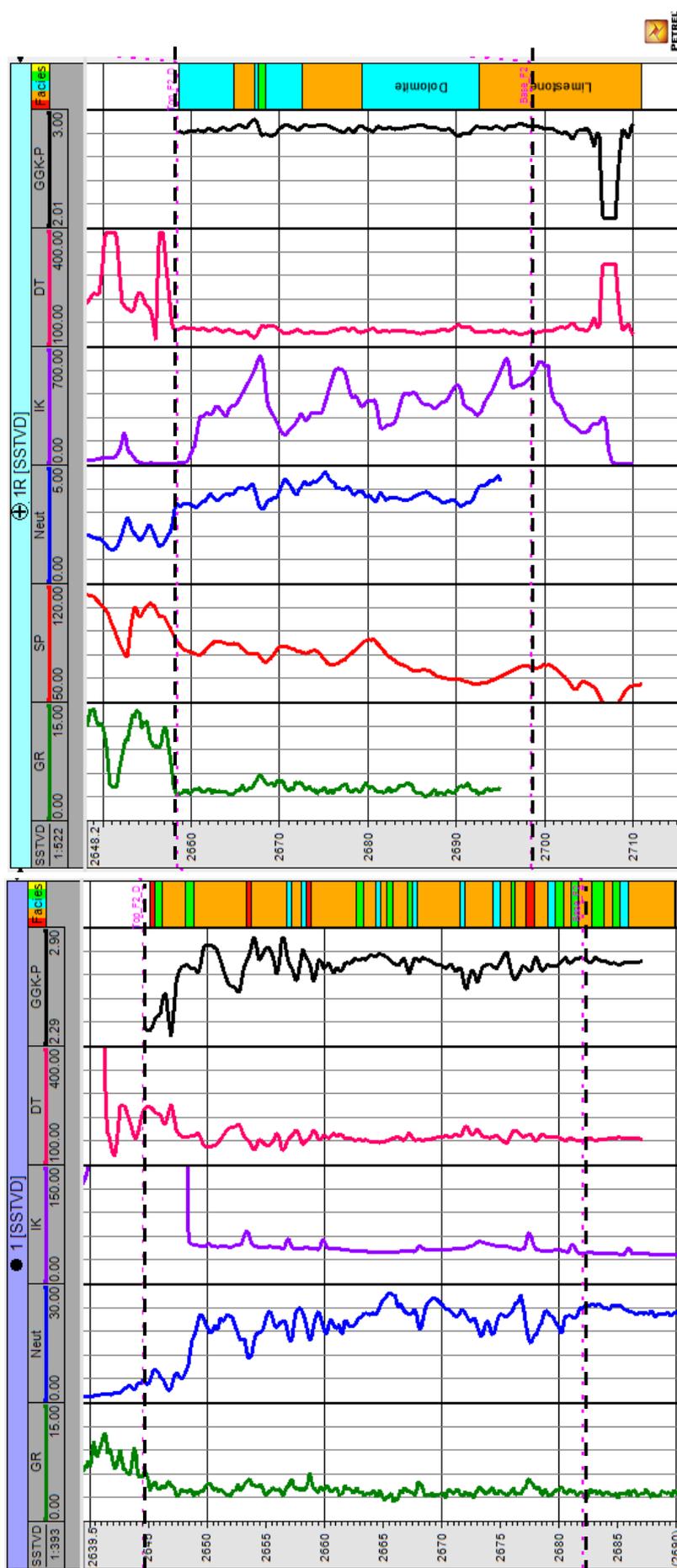


Рис. 2. Сопоставление данных плотности по керну и ГИС для кейса 4

Fig. 2. Comparison of core density and well logging for case 4

Таким образом, наблюдается хорошая корреляционная связь, корректное сопоставление точечных данных и диапазон плотности пород, соответствующий опубликованным данным. Следовательно, для расчета плотности по данным ГИС был принят последний вариант.



Результаты геофизических исследований скважин:

Известняк Доломит Глинисто-кремнистые породы Эффузивные породы

GR (Gamma Ray), grPI – ГК (гамма каротаж), $\text{mR}/\text{ч}$; SP (Resistivity Log), mV – РС (каротаж сопротивления), mB ; Neut (Neutron Log), % – НКТ (нейтронный каротаж), %; IK (Induction Log), mSm – ИК (индукционный каротаж), mSim ; DT (Acoustic Log), us/ft – АК (акустический каротаж продольной волны), $\text{mкс}/\text{м}$; GGK-P (gamma-gamma density Log), g/cm^3 – ГГК-П (плотностной гамма-гамма каротаж), $\text{г}/\text{см}^3$

Рис. 3. Корреляционная панель для скважин 1-IR в интервале окна исследования 40 м

Fig. 3. Correlation panel for wells 1-IR in the interval of the study window 40 m

На рис. 3 приведена корреляционная панель строения продуктивного разреза палеозойских отложений для скважин 1-1R. По разрезу достаточно уверенно проведено расчленение по вещественному составу, но при корреляции границ карбонатных отложений возникает неоднозначность, в первую очередь, в местах предполагаемых границ доломитизированных известняков и доломитов. В связи с этим расчленение разреза на литотипы в каждой скважине было основано на значениях низкой радиоактивности, высоких значениях сопротивления и нейтронного каротажа для карбонатных отложений, низких значениях сопротивления, средних и низких значениях нейтронного каротажа для глинисто-кремнистых пород. Также были выделены эффузивы исходя из высоких значений индукционного каротажа и радиоактивности [9, 10].

Благодаря выполненной типизации разреза палеозойского комплекса с привлечением геофизических исследований удалось выделить процентное содержание фации в каждой скважине. Результаты статистического анализа представлены в табл. 2.

Таблица 2. Сводная таблица фацеального анализа на основе данных ГИС

Table 2. Summary table of facies analysis based on well logging

| Литотип, % Lithotype, % | Глинисто-кремнистые Argillaceous-siliceous | Алевролит Siltstone | Доломит Dolomite | Известняк Limestone | Эффузивы Effusive | Преобладающий литотип Prevailing type |
|----------------------------|---|------------------------|---------------------|------------------------|----------------------|---|
| Скважина Well | | | | | | |
| 5 | – | – | 30,50 | 69,50 | – | Известняк Limestone |
| 6 | 5,00 | 2,50 | 17,50 | 70,00 | 5,00 | Известняк Limestone |
| 2 | 4,71 | 3,62 | 17,39 | 71,02 | 3,26 | Известняк Limestone |
| 2R | 8,49 | – | 69,00 | – | 22,50 | Доломит Dolomite |
| 10 | 18,21 | – | 10,59 | 62,28 | 8,89 | Известняк Limestone |
| 1 | 10,00 | – | 9,50 | 76,00 | 4,49 | Известняк Limestone |
| 1R | 1,99 | – | 60,00 | 37,99 | – | Доломит Dolomite |
| 4 | – | – | 17,27 | 82,73 | – | Известняк Limestone |
| 4R | 100 | – | – | – | – | Глинисто-кремнистые Argillaceous-siliceous |
| 3 | – | – | 40,43 | 59,57 | – | Известняк Limestone |
| 3R | – | – | 69,50 | 24,00 | 6,49 | Доломит Dolomite |
| 9 | – | – | 45,14 | 54,86 | – | Известняк Limestone |
| 8 | – | – | 67,15 | 32,85 | – | Доломит Dolomite |

Комплекс сформированных мероприятий, направленный на прогнозирование фацеальной обстановки, позволил выделить три группы скважин:

1. Глинисто-кремнистые породы – скважины 4R [7].
2. Доломит – скважины 2R, 1R, 3R и 8.
3. Известняк – скважины 5, 6, 2, 10, 1, 4, 3 и 9.

Как отмечалось ранее, при рассмотрении предложенного подхода необходимо получить расчетные значения акустического импеданса на основе данных ГИС для сопоставления с расчетными значениями акустического импеданса по данным лабораторных исследований керна. Таким образом, акустический импеданс был рассчитан с помощью формулы (1) для шести скважин и на основе полученных данных построена частота встречаемости сейсмического параметра.

Анализ распределения акустического параметра показал две отчетливо выраженные области, отличающиеся акустическим сопротивлением среды, что, вероятно, связано с расчленением на литотипы по данным интерпретации геофизических исследований. Для выделения и подтверждения преобладающих фаций в скважинах значения акустического импеданса были разделены на два кластера согласно табл. 2, что представлено на рис. 4. По оси X отложена рассчитанная переменная акустического импеданса, а по оси Y отображена частота встречаемости, а именно, количество наблюдений, попадающих в соответствующий диапазон на оси X.

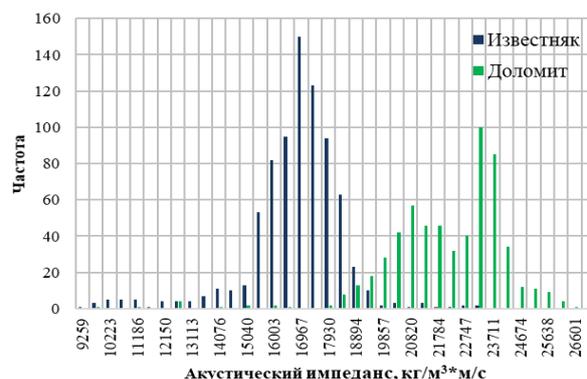


Рис. 4. Гистограмма распределения акустического импеданса по данным ГИС для скважин 2, 2R, 10, 1, 1R и 3R

Fig. 4. Histogram of acoustic impedance distribution according to well log data for wells 2, 2R, 10, 1, 1R and 3R

Согласно полученным результатам, отчетливо выделяются две области, различающиеся по литологическому составу, – известняки и доломиты, что является следствием и подтверждением интерпретации ГИС и представлено в табл. 2.

Исходя из неполного комплекса ГИС, что вносит неопределенность в анализ фацеального распределения, необходимо осуществить комплексирование имеющихся геофизических данных с лабораторными исследованиями керна.

Анализ лабораторных исследований керна

Комплексный подход к изучению палеозойских отложений – анализ геологического строения территории, седиментационного характера нефтеносного комплекса и распределения геологических тел в межскважинном пространстве, позволит оценить с более

достовой вероятностью фациальное строение изучаемого месторождения [11, 12]. Поэтому на следующем этапе сопоставляются лабораторные исследования керна в скважинах, где он был отобран, с методами ГИС. Необходимо отметить, что отбор керна был осуществлен только из двух эксплуатационных скважин – 1 и 2, что вносит неопределённость для пространственной корреляции разреза. Согласно опубликованным данным [13], для создания физической зависимости необходимо не менее 30 точек исследования, что является выполнимым, так как количество образцов керна в исследуемом интервале двух скважин составляет 65 шт. На основе измерений, проведенных на керновом материале, был рассчитан акустический импеданс по формуле (1).

Помимо установленных закономерностей распределения фаций по разрезу с помощью данных ГИС, уточнено изменение акустического импеданса с помощью кернового материала, что позволило выделить наиболее достоверные кластеры фаций, благодаря точечным исследованиям в скважине (рис. 5).

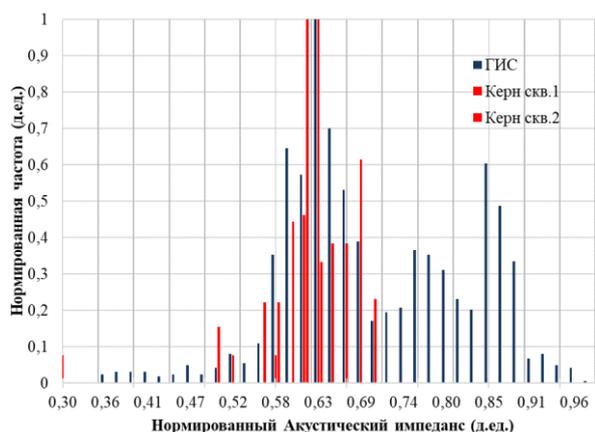


Рис. 5. Гистограмма распределения акустического импеданса по данным ГИС для скважин 2, 2R, 10, 1, 1R и 3R

Fig. 5. Histogram of acoustic impedance distribution according to well log data for wells 2, 2R, 10, 1, 1R and 3R

Исходя из комплексирования геофизических данных и лабораторных исследований керна для набора скважин – 2, 2R, 10, 1, 1R и 3R, был сделан окончательный прогноз распределения фаций в области расположения этих скважин, где были выделены две группы литотипов – доломиты и известняки.

О методике проведения атрибутивного анализа

Для потенциальной возможности выделения геологических объектов была сформирована методика сопоставления акустического импеданса, полученного из первоначального источника – сейсмические данные, с расчетными акустическими свойствами по ГИС и керну. Для того чтобы сформировать определенные кластеры фаций, было осуществлено объединение различных сейсмических атрибутов, что в дальнейшем способствовало сравнению их с точечными данными в скважине [14–17]. Следовательно,

необходимо оконтурить область для исследования около каждой скважины, где размер исследуемой площади охватывает наименьшее расположение точек отражения по горизонтали, для того чтобы корректно распознать две отдельные точки. Таким образом, отражающая область по латерали вокруг скважины характеризует первую зону Френеля. В связи с этим стратегия выбора радиуса исследуемой области около скважины основана на полуволновой зоне Френеля. Первая зона Френеля была рассчитана по формуле (2), где радиус исследования равен 400 м.

$$R = \sqrt{V * H / f}, \quad (2)$$

где R – первая зона Френеля, м; V – скорость, м/с; H – глубина, м; f – частота, Гц.

Благодаря выбранной области исследования около скважин с привлечением сейсмических данных удалось построить частотные распределения для всего комплекса атрибутов. Были рассмотрены такие сейсмические атрибуты, как мгновенная частота, мгновенное качество, мгновенная фаза, затухание, первая производная и относительный акустический импеданс [18–21]. При анализе полученных распределений было отмечено, что мгновенная частота и относительный акустический импеданс представляют репрезентативные данные с точки зрения физического смысла, а также данные, на которых возможно выделить три области распределения, вероятно, соответствующие трем кластерам фаций, как и по геофизической информации в скважинах. Однако полное разделение на кластеры фаций отсутствует, поэтому возникает степень неопределенности разделения по сейсмическим свойствам. С целью сужения диапазона неопределенности в прогнозировании фациального строения изучаемого месторождения был выбран сейсмический атрибут относительного акустического импеданса, так как данное свойство сопоставимо с расчетными значениями акустического импеданса по скважинным данным. При построении частоты распределения сейсмического параметра была учтена оценка фациального строения по геолого-геофизической информации, следовательно, шести скважинам была присвоена определенная фация согласно табл. 2.

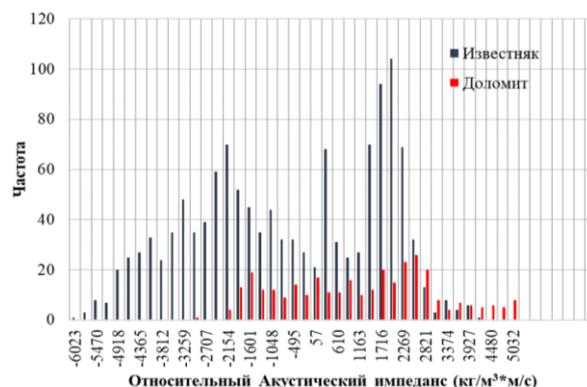


Рис. 6. Гистограмма распределения значений сейсмического атрибута относительного акустического импеданса

Fig. 6. Histogram of distribution of seismic attribute values of relative acoustic impedance

Имея статистическую оценку пространственного распределения фаций по скважинным данным, представляется возможным использовать данную классификацию для анализа распределения литотипов по сейсмическим данным [22–24]. Анализируя полученное частотное распределение на рис. 6, стоит отметить, что выделяется одна отчетливая зона определенной фации – известняк. Но также необходимо указать, что возникают неопределенности при разделении на кластеры для фации доломита. Данный факт может быть вызван, например, схожим литологическим строением территории или разрешающей способностью методов исследования.

Выводы

Резюмируя все вышесказанное, можно представить предложенный подход анализа пространствен-

ного распределения фациального строения следующим образом [25, 26]:

1. Проверка наличия необходимых измерений (акустические свойства горной породы) для расчета сейсмического параметра. В случае отсутствия исследований восстановление значений акустического каротажа или плотности горных пород.
2. Получение расчетных значений акустического параметра на основе сейсмической информации, геофизических исследований и проведенных лабораторных исследований керна.
3. Учет интерпретации всех исследований для уменьшения неопределенностей геологического строения и прогнозирования перспективных областей для планирования стратегии бурения.
4. Применение статистических данных по пробуренному фонду скважин для оценки фациального строения изучаемой территории.

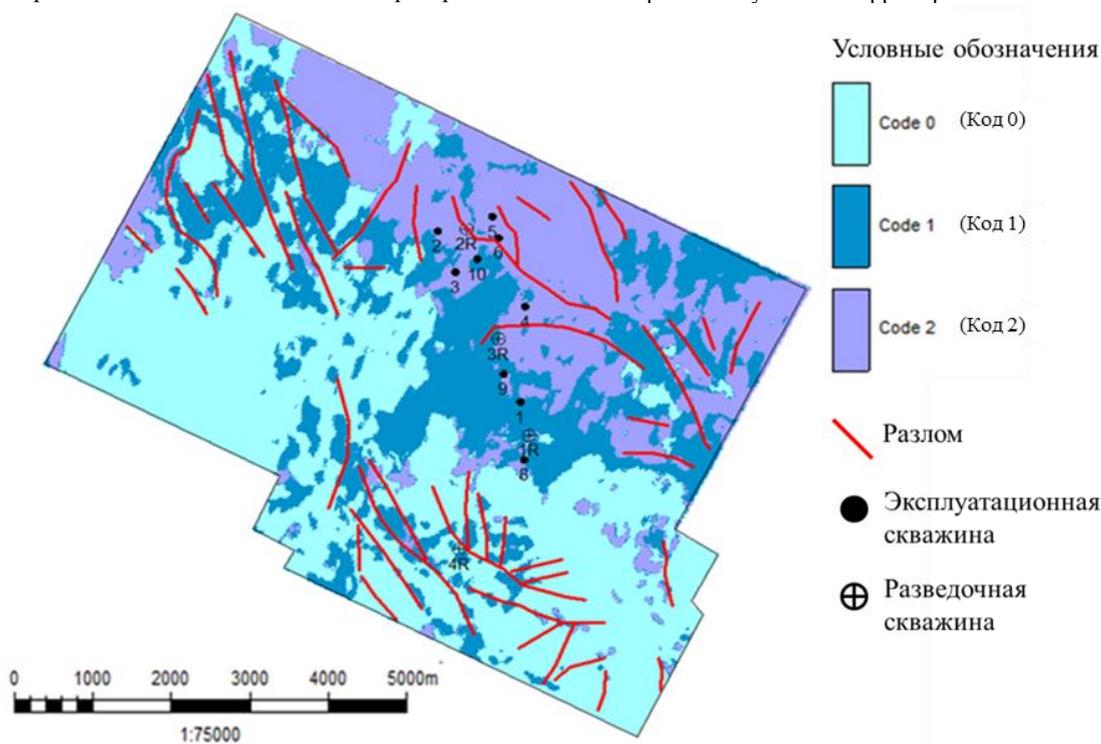


Рис. 7. Сейсμοфаціальна карта складнобудованих карбонатних товщ по кровлі фундаменту Ф2
Fig. 7. Seismic facies map of complex carbonate reservoir over the top of the basement F2

Таким образом, был произведен детальный анализ исходных данных и выполнена статистическая интерпретация, где было выявлено, что разведочные скважины 2R и 1R вскрывают в преобладающем объеме доломит, а три эксплуатационные скважины – 2, 10, 1 – и одна разведочная скважина – 3R – охарактеризованы карбонатной разностью известняк.

Заключение

В работе предложено статистическое обоснование сейсмического фациального анализа, основанное на применении комплексирования геолого-геофизической информации. В ходе анализа было установлено, что при наличии площадного распределения фаций изучаемого объекта, полученного в результате анализа

формы сейсмического сигнала, можно провести районирование территории. Однако восстановление обстановок осадконакопления и прогноз фаций следует осуществлять совместно с интерпретацией ГИС и лабораторными исследованиями керна. В условиях комплексного анализа геолого-геофизических данных была выявлена вероятность наличия определенной фации в районе каждой скважины. Необходимо отметить, что были приняты шесть скважин с достоверным распределением фаций по сейсмическим и скважинным данным. В результате вышеизложенного можно сделать заключение, что для проведения качественного анализа необходимо планировать бурение новых скважин или отбор керна на основе комплексной интерпретации геолого-геофизических данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гидродинамические исследования скважин: анализ и интерпретация данных / Т.А. Деева, М.Р. Камардинов, Т.Е. Кулагина, П.В. Мангазеев. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. – 243 с.
2. Покрепин Б.В. Разработка нефтяных и газовых месторождений. – Волгоград: Ин-Фолио, 2008. – 192 с.
3. Brand U., Veizer J. Chemical diagenesis of a multicomponent carbonate system – 1: trace elements // Journal of Sedimentary Petrology. – 1980. – V. 50. – № 4. – P. 1219–1236.
4. Choquette Ph.W., James N.P. Diagenesis 12. Diagenesis in limestones – 3. The deep burial environment // Geoscience Canada. – 1987. – V. 14. – № 1. – P. 3–35.
5. Алтунина Л.К., Кувшинов В.А., Кувшинов И.В. Увеличение нефтеотдачи в карбонатных коллекторах // NEFTEGAZ.RU. – 2017. – № 3. – С. 99–103.
6. Белоновская Л.Г. Трещиноватость карбоновых пород и разработанные во ВНИГРИ основы поисков трещинных коллекторов нефти и газа // Нефтегазовая геология. Теория и практика. – 2006. – С. 9–13.
7. Ежова А.В., Меркулов В.П., Чеканцев В.А. Геологическая модель строения палеозойского фундамента Северо-Останинского нефтяного месторождения (Томская область) // Горный журнал. – 2012. – S4. – С. 35–38.
8. Бондарев В.И., Крылатков С.М. Анализ данных сейсморазведки. – Екатеринбург: Изд-во УГГГА, 2002. – С. 63–74.
9. Tiab D., Donaldson E.C. Petrophysics. – Houston, 1999. – P. 94–102.
10. Дахнов В.Н. Интерпретация результатов геофизических исследований скважин. – М.: Недра, 1982. – 448 с.
11. Olneva T., Ovechikina V., Zhukovskaya E. Object-oriented geoseismic analysis: ways and examples // XVII Serbian geological congress. Book of abstracts. – Serbia, 2018. – P. 707–713.
12. Seismic facies analysis and structural interpretation of the Sandakan sub-basin / K. Futralan, A. Mitchell, K. Amos, G. Backe // AAPG international conference and exhibition. – Singapore, 2012. – P. 1–18. URL: http://www.searchanddiscovery.com/pdfz/documents/2012/30254futralan/ndx_futralan.pdf.html (дата обращения 30.11.2019).
13. Методические рекомендации по подсчету геологических запасов нефти и газа объемным методом / под ред. В.И. Петерсильс, В.И. Пороксуна, Г.Г. Яценко. – М.; Тверь: ВНИГНИ, НПЦ «Тверьгеофизика», 2003. – С. 3-14–3-20.
14. Volkova A.A., Merkulov V.P. Information value of 3D seismic in evaluation the prospects of oil and gas fields of the Paleozoic basement of Western Siberia // 8th EAGE Saint Petersburg International Conference and Exhibition. Extended abstract. – St-Petersburg, 2018. – P. 1–5. URL: earthdoc.eage.org/publication/publicationdetails/?publication=91397 (дата обращения 10.12.2019).
15. Волкова А.А. Комплексный анализ сейсмических и скважинных данных при изучении трещиноватых коллекторов на примере месторождения в фундаменте Западной Сибири // Проблемы геологии и освоения недр: Труды XXI Международного научного симпозиума имени академика М.А. Усова студентов и молодых ученых. – Томск: Томский политехнический университет, 2017. – Т. I. – С. 356–358.
16. Волкова А.А. Выбор оптимальных параметров сейсмического фациального анализа при изучении палеозойских отложений Западной Сибири // Проблемы геологии и освоения недр: Труды XXII Международного научного симпозиума имени академика М.А. Усова студентов и молодых ученых. – Томск: Томский политехнический университет, 2018. – Т. I. – С. 383–384.
17. Волкова А.А. Применение сейсмофациального анализа для уточнения схемы геологического строения на примере месторождения в фундаменте Западной Сибири // Современные проблемы седиментологии в нефтегазовом инжиниринге: Труды III Всероссийского научно-практического седиментологического совещания. – Томск, 2017. – С. 223–228.
18. White R.E. Properties of instantaneous seismic attributes // The Leading Edge. – 1991. – V. 10 (7). – P. 26–32.
19. Skirius C., Nissen S., Haskell N. 3D seismic attributes applied to carbonates // The Leading Edge. – 1999. – V. 18. – P. 384–393.
20. Saggaf M., Nafi Toksoz M., Mahroon M. Seismic facies classification and identification by competitive neural networks // Geophysics. – 2003. – V. 68. – № 6. – P. 1984–1999.
21. Interactive seismic facies classification using textural attributes and neural networks / B.P. West, S.R. May, J.E. Eastwood, C. Rossen // Lead. Edge. – 2002. – V. 21. – P. 1042–1049.
22. Дюбрюль О. Геоистатистика в нефтяной геологии. – М.; Ижевск: Институт компьютерных исследований, НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2009. – 256 с.
23. Дементьев Л.Ф. Статистические методы обработки и анализа промыслово-геологических данных. – М.: Недра, 1966. – 206 с.
24. Сейсмофациальный анализ и возможности прогнозирования литотипов пород по данным сейсморазведки / Г.Д. Ухлова, В.В. Соломатин, Л.И. Штифанова, Т.И. Чернышова // VII Всероссийское литологическое совещание. – Новосибирск, 2013. – С. 227–230.
25. Coleout P.M., Azbel K. Unsupervised seismic facies classification: a review and comparison of techniques and implementation. Interpreter's corner // The Leading Edge. – October 2003. – P. 942–953.
26. Прогнозирование структуры и свойств природных резервуаров на основе комплексной интерпретации сейсмических и скважинных геолого-геофизических данных / А.П. Жуков, В.А. Жемчугова, К.А. Эпов, С.Л. Федотов // Технологии сейсморазведки. – 2006. – № 1. – С. 69–78.

Поступила 05.02.2021 г.

Информация об авторах

Чучалина К.Ю., магистрант Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Волкова А.А., инженер-исследователь Центра подготовки и переподготовки специалистов нефтегазового дела Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Меркулов В.П., кандидат геолого-минералогических наук, ведущий эксперт Центра подготовки и переподготовки специалистов нефтегазового дела Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 550.834.05

STATISTICAL JUSTIFICATION OF THE CHOICE OF ATTRIBUTIVE PARAMETERS FOR FORECASTING PRE-JURASSIC RESERVOIRS ACCORDING TO SEISMIC DATA

Kristina Yu. Chuchalina¹,
K.Yu.Chuchalina@gmail.com

Aleksandra A. Volkova¹,
VolkovaAA@hw.tpu.ru

Vitaly P. Merkulov¹

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

The relevance of the research is caused by the need to increase the degree of reliable assessment of the geological structure of complex reservoirs in the presence of a small set of geological and geophysical information, which is ambiguous in predicting and identifying geological objects. In recent decades, companies have widely used various classification algorithms in processing the entire complex of data to reduce the uncertainties of geological interpretation. One of the approaches is application of classification methods to a seismic signal, which divide the object under study into areas that are homogeneous by a number of signs, where geophysical well surveys and core studies are also used, which involves the integration of information. A comprehensive interpretation of seismic and borehole data allows predicting a qualitative level lithofacies variability in local areas, which contributes to a more rational placement of production wells.

The main aim of the research is to consider approaches to analyzing a reliable assessment and forecasting the facies structure when searching for promising objects for the most optimal location of exploration wells when planning drilling, taking into account constantly updated and renewed geological information about the formation.

The object of the study is the Paleozoic basement deposits of the southeastern part of the West Siberian Plate, which represent rocks of various material composition, including carbonate differences.

Methods include statistical analysis of seismic information and geological and geophysical data.

The statistical analysis of the spatial change in the facies environment was performed, on the basis of which reliable zones of the presence of certain facies were identified. The proposed strategy for predicting the prospects of oil and gas potential of the Paleozoic sediments on the example of one of the fields in Western Siberia contributed to the identification of promising zones for future planning of well locations.

Key words:

Seismic facies analysis, seismic facies map, well logging, acoustic impedance, core laboratory studies, Paleozoic deposits.

REFERENCES

- Deeva T.A., Kamartdinov M.R., Kulagina T.E., Mangazeev P.V. *Gidrodinamicheskie issledovaniia skvazhin. Analiz i interpretatsiia dannykh* [Well tests: analysis and interpretation of data]. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ. house, 2009. 243 p.
- Pokrepin B.V. *Razrabotka neftiannykh i gazovykh mestorozhdenii* [Development of oil and gas fields]. Volgograd, In-Folio Publ., 2008. 192 p.
- Brand U., Veizer J. Chemical diagenesis of a multicomponent carbonate system – 1: trace elements. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1980, vol. 50, no. 4, pp. 1219–1236.
- Choquette Ph.W., James N.P. Diagenesis 12. Diagenesis in limestones – 3. The deep burial environment. *Geoscience Canada*, 1987, vol. 14, no. 1, pp. 3–35.
- Altunina L.K., Kuvshinov V.A., Kuvshinov I.V. Increase of oil recovery in carbonate reservoirs. *NEFTEGAZ.RU*, 2017, no. 3, pp. 99–103. In Rus.
- Belonovskaia L.G. The fracture of carbonaceous rocks and the bases of the search for cracked oil and gas collectors developed in VNIGRI. *Neftegazovaia geologiya. Teoriia i praktika*, 2006, pp. 9–13. In Rus.
- Ezhova A.V., Merkulov V.P., Chekantshev V.A. Geologicheskay model stroeniya paleozoiskogo fudamenta Severo-Ostaninskogo neftyanovogo mestorozhdeniya (Tomskaya oblast) [Paleozoic basement geological structure model of Northern Ostaninsk oil field (Tomsk region)]. *Mountain Journal*, 2012, S4, pp. 35–38.
- Bondarev V.I., Krylatkov S.M. *Analiz dannykh seismorazvedki* [Analysis of seismic data]. Yekaterinburg, UGGAA Publ. House, 2002. pp. 63–74.
- Tiab D., Donaldson E.C. *Petrophysics*. Houston, 1999. pp. 94–102.
- Dakhnov V.N. *Interpretatsia rezultatov geofizicheskikh issledovaniy skvazhin* [Interpretation of the results of geophysical surveys of wells]. Moscow, Nedra Publ., 1982. 448 p.
- Olneva T., Ovechkina V., Zhukovskaya E. Object-oriented geo-seismic analysis: ways and examples. *XVII Serbian geological congress. Book of abstracts*. Serbia, 2018. pp. 707–713.
- Futalan K., Mitchell A., Amos K., Backe G. Seismic facies analysis and structural interpretation of the San-dakan sub-basin. *AAPG international conference and exhibition*. Singapore, 2012. Available at: www.searchanddiscovery.com/documents/2012/30254futalan/ndx_futalan.pdf (accessed 30 November 2019).
- Metodicheskie rekomendatsii po podschetu geologicheskikh zapasov nefi i gaza obemnym metodom* [Guidelines for calculating the geological reserves of oil and gas by the volumetric method]. Eds. V.I. Petersils, V.I. Poroskuna, G.G. Yatsenko. Moscow, Tver, VNIGNI, Scientific and Practical Center «Tvergeofizika» Publ., 2003. pp. 3-14–3-20.
- Volkova A.A., Merkulov V.P. Information value of 3D seismic in evaluation the prospects of oil and gas fields of the Paleozoic basement of Western Siberia. *8th EAGE Saint Petersburg International Conference and Exhibition. Extended abstract*. St-Petersburg, 2018. Available at: earthdoc.eage.org/publication/publicationdetails/?publication=91397 (accessed 10 December 2018).
- Volkova A.A. Kompleksniy analiz seismicheskikh i skvazginnykh dannykh pri izuchenii treshchinovatykh kollektorov na primere mestorozhdeniya v fundamente Zapadnoy Sibiri [Comprehensive analysis of seismic and well data in the study of fractured reservoirs on the example of a field in the basement of Western Siberia]. *Problemy geologii i osvoeniya nedr. Trudy XXII Mezhdunarodnogo nauchnogo simpoziuma imeni akademika M.A. Usova studentov i molodykh uchenykh* [Problems of geology and subsoil development. Proc. of the XXI International Scientific Symposium named after Academician M.A. Usov students and young scientists]. Tomsk, TPU Publ. house, 2018. Vol. I, pp. 356–358.

16. Volkova A.A. Vybor optimalnykh parametrov seysmicheskogo fatsialnogo analiza pri izuchenii paleozoiskikh otlozheniy Zapadnoy Sibiri [Selection of optimal parameters of seismic facies analysis in the study of Paleozoic deposits in Western Siberia]. *Problemy geologii i osvoeniya nedr. Trudy XXII Mezhdunarodnogo nauchnogo simpoziuma imeni akademika M.A. Usova studentov i molodykh uchenykh* [Problems of geology and subsoil development. Proc. of the XXII International Scientific Symposium named after Academician M.A. Usov students and young scientists]. Tomsk. TPU Publ. house, 2018. Vol. I, pp. 383–384.
17. Volkova A.A. Primenenie seismofatsialnogo analiza dlya utochneniya skhemy geologicheskogo stroeniya na primere mesotorozhdeniya v fundamente Znanoy Sibiri [Use of seismic facies analysis to clarify the geological structure of the field as an example in the basement of Western Siberia]. *Sovremennye problemy sedimentologii v neftegazovom inzhiniringe. Trudy III Vserossiyskogo nauchno prakticheskogo sedimentologicheskogo soveshchaniya* [Modern problems of sedimentology in oil and gas engineering. Proc. of the III All-Russian Scientific and Practical Sedimentology Meeting]. Tomsk, 2017. pp. 223–228.
18. White R.E. Properties of instantaneous seismic attributes. *The Leading Edge*, 1991, vol. 10 (7), pp. 26–32.
19. Skirius C., Nissen S., Haskell N. 3D seismic attributes applied to carbonates. *The Leading Edge*, 1999, vol. 18, pp. 384–393.
20. Saggaf M., Nafi Toksoz M., Mahroon M. Seismic facies classification and identification by competitive neural networks. *Geophysics*, 2003, vol. 68, no. 6, pp. 1984–1999.
21. West B.P., May S.R., Eastwood J.E., Rossen C. Interactive seismic facies classification using textural attributes and neural networks. *Lead. Edge.*, 2002, vol. 21, pp. 1042–1049.
22. Dubruel O. *Geostatistika v neftaynoy geologii* [Geostatistics in petroleum geology]. Moscow, Izhevsk, Institute for Computer Research, SRC «Regular and chaotic dynamics» Publ., 2009. 256 p.
23. Dementiev L.F. *Statisticheskie metody obrabotki i analiz promyslovo-geologicheskikh dannykh* [Statistical methods for processing and analyzing field geological data]. Moscow, Nedra Publ., 1966. 206 p.
24. Ukhlova G.D., Solomatin V.V., Shtifanova L.I., Chernyshova T.I. Seismofatsialny analiz i vozmozhnosti prognozirovaniya litotipov porod po dannym seysmorazvedki [Seismofacial analysis and possibilities of forecasting rock lithotypes by the data of seismic exploration]. *VII Vserossiyskoe litologicheskoe soveshchaniye* [VII All-Russian lithological meeting]. Novosibirsk, 2013. pp. 227–230.
25. Coleout P.M., Azbel K. Unsupervised seismic facies classification: a review and comparison of techniques and implementation. Interpreter's corner. *The Leading Edge*, October 2003. pp. 942–953.
26. Zhukov A.P., Zhemchugova V.A., Epov K.A., Fedotov S.L. Prediction of the structure and properties of natural reservoirs based on a comprehensive interpretation of seismic and borehole geological and geophysical data. *Seismic exploration technologies*, 2006, no. 1, pp. 69–78. In Rus.

Received: 5 February 2021.

Information about the authors

Kristina Yu. Chuchalina, master student, National Research Tomsk Polytechnic University.

Aleksandra A. Volkova, engineer-researcher, National Research Tomsk Polytechnic University.

Vitaly P. Merkulov, Cand. Sc., leading expert, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 556.3

КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ФОРМИРОВАНИЯ РЕСУРСОВ МИНЕРАЛЬНЫХ ВОД НИЖНЕ-КАРМАДОНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Клюев Роман Владимирович¹,
kluev-roman@ramler.ru

Голик Владимир Иванович²,
v.i.golik@mail.ru

Босиков Игорь Иванович²,
igor.boss.777@mal.ru

¹ Московский политехнический университет,
Россия, 107023, г. Москва, ул. Б. Семеновская, 38.

² Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственного технологического университета),
Россия, 362021, г. Владикавказ, ул. Николаева, 44.

Актуальность. На протяжении многих веков человечество использует источники целебных вод. Минеральная вода применяется как для лечения, так и для целей профилактики. При этом ее целебные свойства проявлялись при повсеместном использовании. Уже начиная с XV в. до нашей эры индийские Веды дают представления об уникальных свойствах минеральных вод. Воду из минеральных и пресных источников использовали для целей гигиены и лечения в Древнем мире, в частности в Египте, Вавилоне, Ассирии. Следует отметить, что всегда давалась высокая оценка именно подземным водам. Исследования обусловлены необходимостью комплексного исследования Нижне-Кармадонского месторождения для пополнения запасов минеральных вод в Российской Федерации.

Цель: проведение комплексного анализа химического состава минеральных вод Нижне-Кармадонского месторождения и определение физико-химических и лечебных свойств минеральных вод месторождения.

Объекты: минеральные воды Геналдонского ущелья, Нижне-Кармадонского месторождения, Казбекско-Джигарайского массива.

Методы: структурно-тектонический метод, метод аналогий, метод моделирования, геофизические методы – термокаротажные исследования скважин, метод фацеального анализа, геоморфологический метод, метод геометризации недр. Геохимические условия участка недр оценивались путем замеров температуры воды на устьях скважин.

Результаты. По проведенным исследованиям, согласно ГОСТ Р 54316-2011 и «Основным критериям химического состава минеральных вод», воды месторождения являются мало- и среднеминерализованными, хлоридными натриевыми, борными, высокотермальными. По физико-химическим и лечебным свойствам минеральные воды участка недр ООО «Ариана» рекомендованы в лечебно-питьевых целях прилагаясь медицинским показаниям. Исходя из величины постоянной разгрузки минеральных вод на площади месторождения в количестве 18200 м³/сут, запасы минеральных вод участка вполне обеспечены источниками формирования.

Ключевые слова:

Термальные минеральные и хлоридные натриевые воды, зоны разломов и трещиноватости, месторождение, комплекс трещинно-жильных вод, термокаротажные исследования скважин, зоны разломов, трещины.

Введение

Рассматриваемый в работе участок является южной частью Нижне-Кармадонского месторождения термальных минеральных вод и находится в 35 км к ЮЮЗ от г. Владикавказа, в горной части Республики Северная Осетия–Алания (Геналдонское ущелье), на левом берегу р. Геналдон (рис. 1).

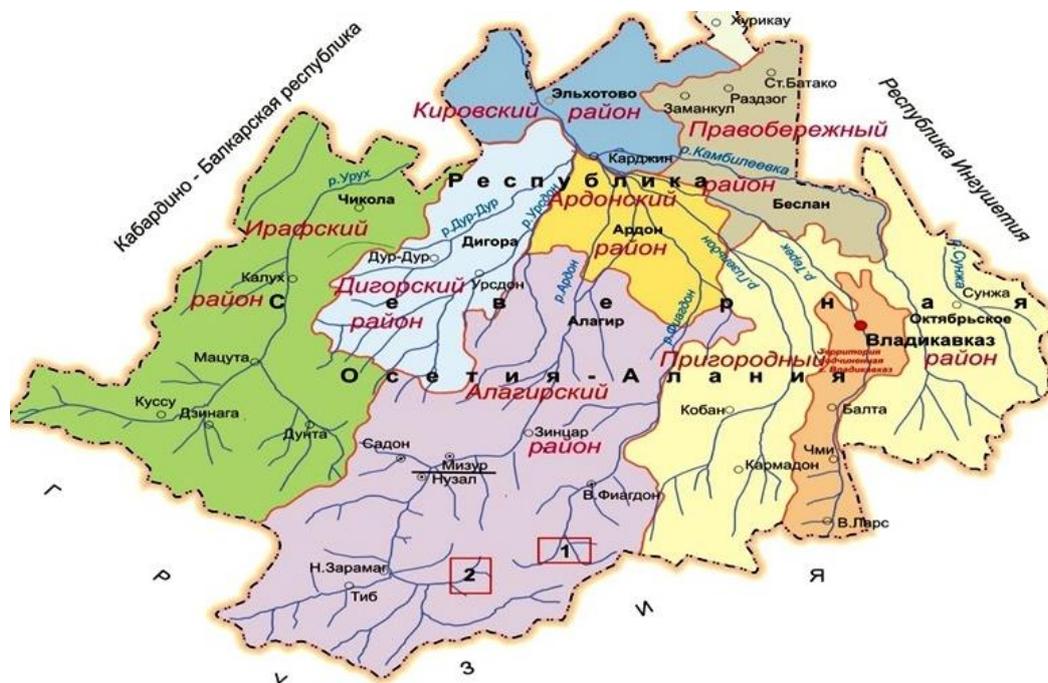
Участок является южной частью Нижне-Кармадонского месторождения минеральных вод, расположен в пределах Казбекско-Джигарайского горно-ледникового массива Бокового Кавказского хребта (рис. 2). Минеральные воды приурочены к зонам разломов и повышенной трещиноватости в толще осадочных пород J₁. В структурном отношении участок приурочен к сводовой части Геналдонской антиклинали, входящей в состав тектонической зоны Северного склона антиклинария Большого Кавказа. Нижне-Кармадонское месторождение разведано в

конце XX в. 12-ю скважинами; запасы в количестве 2200 м³/сут утверждены протоколом ГКЗ СССР по категории А. В соответствии с условиями воды месторождения термальные (33–55 °С), метаново-азотные, хлоридные (реже гидрокарбонатно-хлоридные) натриевые, борные, средней минерализации (2,8...5,8 г/дм³).

Все разведочные скважины к настоящему времени ликвидированы. В процессе гидрогеологических исследований в 2014–2015 гг. бурение новых скважин не осуществлялось; переоценка запасов произведена по двум эксплуатационным скважинам № 27 и 29-р, проявившимся после катастрофического схода ледника Колка 20.09.2002 г. [1–13]. Воды жильно-трещинные, вскрыты на глубине 330–817 м. Минеральные воды скважины самоизливаются с избыточным напором до +400 м (расчетная величина). В процессе работ оценен режим скважин № 27 и 29-р, качественный состав воды, санитарно-экологическое состояние участка и при-

легающей территории; по фондовым материалам охарактеризован целевой водоносный комплекс J₁. За период с 1957 г. по настоящее время качественный состав минеральных вод стабильный. По данным современных исследований воды термальные (43–50 °С)

хлоридные (гидрокарбонатно-хлоридные), натриевые, борные, Кармадонского и Урсдонского типов, лечебные, с минерализацией 3,2...5,7 г/дм³. Подсчитаны запасы гидравлическим методом [1, 2] по категории В (разведанные) – 152 м³/сут.



Условные обозначения:

- 1 – Нижне-Камадонское месторождение
- 2 – Верхне-Камадонское месторождение

Рис. 1. Обзорная карта РСО–Алания. Масштаб 1:750000
 Fig. 1. Overview map of North Ossetia–Alania. Scale 1:750000



Рис. 2. Казбекско-Джimarайский массив (вид с северо-востока): 1 – гора Казбек; 2 – гора Майлихох; 3 – гора Джimarайхох; 4 – гора Шаухох; 5 – ложе ледника Колка; 6 – ледник Майли; 7 – долина р. Геналдон (исток)
 Fig. 2. Kazbek-Dzhimarai massif (view from the north-east): 1 – Mount Kazbek; 2 – Mount Mailikhokh; 3 – Mount Dzhimarai; 4 – Mount Shaukhokh; 5 – the Kolka glacier bed; 6 – Mayli glacier; 7 – valley of the Genaldon river (source)

Структурно-тектоническое и гидрогеологическое положение

Участок недр ООО «Ариана», являющийся южной частью Нижне-Кармадонского месторождения минеральных вод [1, 2], в геоструктурном отношении приурочен к тектонической зоне Северного склона (структура II порядка), входящей в состав антиклинория Большого Кавказа (структура I порядка). Зона Северного склона – сложное складчато-глыбовое сооружение, в основе которого лежит крупная продольная структура, представленная серией кулисообразно залегающих антиклинальных складок, ограниченных поперечными поднятиями и прогибами.

Основным тектоническим элементом зоны Северного склона, обуславливающим геологическое строение оцениваемого участка недр, является Геналдонская антиклиналь (структура III порядка), возникшая в результате глыбового движения кристаллического фундамента. Антиклиналь расположена в средней части долины р. Геналдон.

Геналдонская антиклиналь сложена нижнеюрскими отложениями, сильно сжата и опрокинута на север, вследствие чего ее осевая плоскость круто ($80\text{--}85^\circ$) наклонена к югу, а породы в крыльях залегают изоклиinallyно с падением к югу и юго-востоку.

К востоку и западу от долины р. Геналдон (рис. 3) шарнирная часть Геналдонской антиклинали испытывает погружение, вследствие чего антиклиналь имеет характер брахиантиклинали. Кроме того, верхняя часть антиклинали размыта, в результате чего породы фундамента залегают на меньшей глубине, чем на прилегающих к месторождению площадях, где фундамент располагается, по-видимому, на глубине не менее 2000 м.

В пределах Геналдонской антиклинали установлены разрывные нарушения, среди которых наиболее крупными являются Кауридонский, Нижне-Кармадонский сброс и Тагаурский взброс амплитудами около 1500 м. Все эти нарушения имеют общее субширотное простирание и крутое ($80\text{--}90^\circ$) падение на юг. Таким образом, эти сбросы и взбросы секут Геналдонскую антиклиналь под острым углом к ее простиранию.

Наряду с крупными разрывными дислокациями антиклиналь разбита многочисленными мелкими нарушениями типа сбросов и зон дробления, среди которых преобладают нарушения северо-западного ($310\text{--}320^\circ$) простирания с крутыми ($80\text{--}90^\circ$) падениями на юго-запад.

Также здесь имеются поперечные разломы субмеридионального простирания, слабо изученные по той причине, что направление их совпадает с направлением долины р. Геналдон.

В пределах Геналдонской антиклинали породы сильно трещиноваты. Среди трещин наиболее распространенными являются трещины субмеридионального (ССВ) простирания с крутым падением к востоку и западу. Ввиду того, что простирание данных трещин совпадает с направлением долины р. Геналдон, изучены они слабо.



Рис. 3. Бассейн реки Геналдон

Fig. 3. Genaldon river basin

Меньшим распространением пользуются здесь трещины северо-западного и субширотного простирания с падением на юго-запад под углами $50\text{--}75^\circ$. Последние обычно сгруппированы в зоны трещиноватости значительной протяженности. По типу они являются трещинами скола.

Предыдущими исследователями установлено, что трещины скола притерты и закрыты или выполнены глинистым веществом, в то время как субмеридионально-поперечные трещины разрыва чаще открыты, в связи с чем являются основными путями циркуляции минеральных вод [3–5].

Таким образом, геологическая обстановка Нижне-Кармадонского месторождения сложная, для нее характерна сильная раздробленность и трещиноватость пород.

Ввиду того, что оцениваемый участок недр ООО «Ариана» входит в состав Нижне-Кармадонского месторождения, он рассматривается как южная часть мощного очага разгрузки термальных минеральных вод, приуроченного к Геналдонской антиклинальной структуре. Последняя разбита крупными Кауридонским, Нижне-Кармадонским и Тагаурским субширотными разломами с амплитудами до 1500 м, а также сопряженными с ними многочисленными мелкими разрывными нарушениями и зонами трещиноватости.

Крупные тектонические разломы субширотного простирания, будучи трещинами скола, отличаются значительной притёртостью и представляют собой серию зеркал скольжения с глиной трения, зоны смятия, интенсивного дробления и брекчирования пород мощностью до 20 м. Оперяющие трещины северо-западного и северо-восточного простирания характеризуются незначительной протяжённостью, часто залечены кварц-кальцитовым материалом или закальцитированы. Следовательно, как крупные, так и оперяющие разломы субширотного простирания не могут служить путями циркуляции подземных вод на месторождении. Циркуляция минеральных вод и их разгрузка происходят, по-видимому, по разломам и трещинам субмеридианального направления. При этом участки наибольшей приподнятости кристаллического основания (в ядре Геналдонской антиклинали), где трещины более приоткрыты, являются максимально благоприятными в смысле выведения минеральных вод на поверхность.

Водовмещающими породами на участке являются нижнеюрские терригенные отложения мизурской (J_{1mz}) и кистинской (J_{1kst}) свит. Таким образом, в качестве целевого гидростратиграфического таксона для оцениваемого участка недр ООО «Ариана» можно рассматривать водоносный комплекс трещинно-жильных вод нижнеюрских отложений (рис. 4).

Питание водоносного комплекса происходит на ледниках и снежниках Казбекско-Джидмарайского

массива, а также на склонах долины р. Геналдон за счет атмосферных осадков.

Как показало бурение скважин в прошлые годы, верхняя часть пород мизурской свиты (до глубины 50–80 м) обводнена за счет их трещиноватости в зоне выветривания (трещинно-грунтовые воды). Ниже зоны выветривания количество трещин быстро уменьшается и породы становятся менее водообильными. Здесь водоносность пород носит локальный характер, воды циркулируют главным образом в зонах разломов и повышенной трещиноватости (трещинно-жильные воды). С глубиной минерализация воды увеличивается, так, например, в процессе бурения скв. № 27 в интервале 602–760 м отмечался приток вод с минерализацией порядка 3 г/дм³, а в интервале 780–1225 м – с минерализацией более 6 г/дм³.

На ранней стадии изучения Нижне-Кармадонского месторождения были определены основные параметры, характеризующие гидрогеологические свойства вскрытых разведочными скважинами водоносных зон. Значения водопроницаемости, рассчитанные по данным восстановления уровней в целом для всего месторождения, варьируют от 0,447 до 11,86 м²/с, коэффициент пьезопроводности (α) – от $0,77 \cdot 10^{-4}$ до $3,78 \cdot 10^{-5}$ м²/с. Значение последнего конкретно для оцениваемого участка недр, по-видимому, меньше, так как по данным разведочной скв. № 6 (южная часть участка недр ООО «Ариана») составило $0,055 \cdot 10^{-4}$ м²/сут.



Рис. 4. Верхне-Кармадонские источники

Fig. 4. Upper Karmaдон sources

При исследовании месторождения большая часть скважин взаимодействовала между собой. Значения коэффициентов влияния колеблются от 0,67 до 0,75. Коэффициенты снижения дебита по взаимодействующим скважинам варьировали от 0,15 до 0,25.

По данным современных режимных наблюдений минеральные воды участка обладают высокими напо-

рами от +285 м (замеренное в скв. № 27) до +400 м (расчетное для скв. № 29-р). Наличие значительных напоров обуславливает разгрузку минеральных вод в источниках (преимущественно малодебитных). Циркулирующие по разломам и трещинам воды выходят под делювиально-аллювиальный комплекс осадков, поэтому на месторождении распространены в основ-

ном минеральные источники рассредоточенного типа. Наличие довольно мощного (иногда до 65 м) четвертичного покрова затрудняет фильтрацию трещинно-жилных вод к поверхности (они, по-видимому, растекаются по этим отложениям), и поэтому на оцениваемом участке отмечается всего два более или менее чётко выраженных источника вод. Этот же фактор определяет и значительное разубоживание минеральных вод источниками водами из трещин и грунтов, текущих со стороны коренных склонов [6–10].

Значительное количество подземных вод разгружается в аллювий или непосредственно в р. Геналдон. Последнее обстоятельство обуславливает довольно высокую минерализацию воды в реке в створе Нижне-Кармадонского месторождения (до 0,47 г/дм³). Расчёты, произведённые исходя из соотношения минерализации воды в р. Геналдон и выносимых в реку минеральных и пресных вод из скважин (на примере скв. № 29-р), показали, что суммарная величина невидимой разгрузки может достигать более 200 дм³/с.

Геотермические условия участка недр оценивались путем замеров температуры воды на устьях скв. № 27, 29-р и 30. Наблюдениями установлено, что на протяжении всего календарного года температура воды на устьях скважин остается стабильной, составляя в среднем для скважин № 29-р и 27, соответственно, 43 и 50 °С. Высокие температуры минеральных вод и их стабильность указывают на то, что они поднимаются с больших глубин (порядка 1500–2000 м от поверхности рельефа), по-видимому, из домезозойского фундамента, который в пределах месторождения залегает примерно на той же глубине.

Более детальными термокаротажными исследованиями прошлых лет в скв. № 27 была установлена геотермическая ступень (расстояние по глубине, на котором температура повышается на 1 °С), составившая 13,7 м. Полученная величина геотермической ступени значительно меньше таковых для условий Северного Кавказа в целом, тем не менее она отражает общую закономерность геотермических условий оцениваемого участка недр [11–15]. По характеру размещения изотерм на участке наблюдается геотермическая аномалия, обуславливающая повышенную температуру минеральных вод. Наличие такой аномалии объясняется залеганием на глубине около 2000 м (ниже уровня моря) магматической камеры с температурой 270–300 °С.

Образование газового и химического состава минеральных вод

Вопрос формирования минеральных вод Нижне-Кармадонского месторождения, безусловно, сложный. На этапе детальной разведки месторождения в середине XX в. гидрогеологами была предпринята попытка решить данный вопрос на основании полученного фактического материала и общих представлений о геолого-гидрогеологической обстановке района. При этом авторы статьи признали, что данный фактический материал является довольно ограниченным и крайне недостаточным для окончательного суждения об условиях формирования Нижне-Кармадонских минеральных вод.

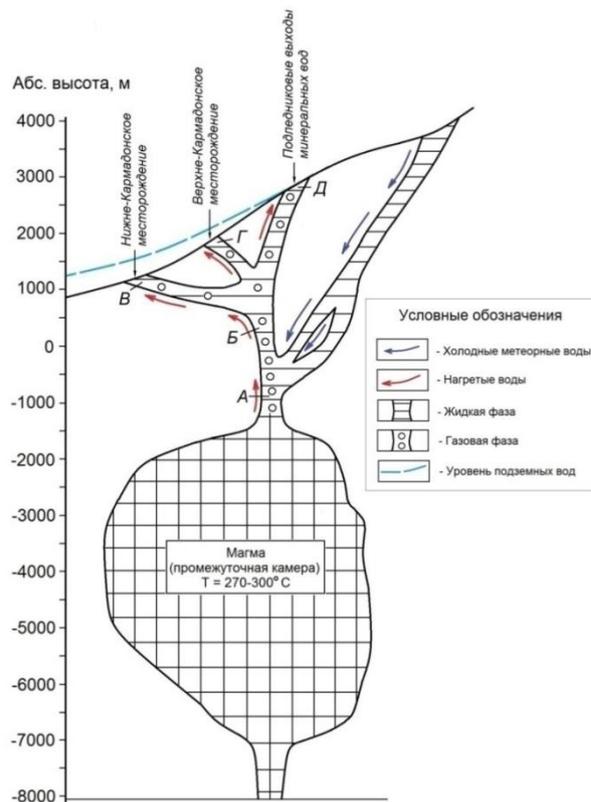


Рис. 5. Схема возможного преобразования магматогенных газожидких растворов: А – гидротермальный Cl-Na раствор: нагретые воды, пар и газы (O_2 , CO_2 , H_2S , N_2 и CH_4); Б – смешанные Cl-Na воды, богатые газами; В – смешанные HCO_3 -Cl-Na воды с газами (Нижне-Кармадонское месторождение); Г – смешанные SO_4 - HCO_3 -Cl-Na воды с газами (Верхне-Кармадонское месторождение); Д – SO_4 -Cl-Na воды с высоким содержанием металлов (подледниковые Колкинские и др. минеральные воды)

Fig. 5. Scheme of possible transformation of magmatogenic gas-liquid solutions: А – hydrothermal Cl-Na solution: heated water, steam and gases (O_2 , CO_2 , H_2S , N_2 and CH_4); Б – mixed Cl-Na waters, rich in gases; В – mixed HCO_3 -Cl-Na water with gases (Nizhne-Karmadon field); Г – mixed SO_4 - HCO_3 -Cl-Na waters with gases (Verkhne-Karmadon field); Д – SO_4 -Cl-Na waters with high metal content (subglacial Kolkinskie and other mineral waters)

Учитывая, несомненно, авторитетные мнения гидрогеологов – исполнителей геологоразведочных работ и экспертов ГКЗ РФ, тем не менее, авторы настоящей работы рассматривают универсальную схему формирования химического состава минеральных вод за счет преобразования магматогенных газожидких растворов (рис. 5). Схема является универсальной и может использоваться для исследований многих месторождений минеральных вод. В своих исследованиях ранее применяли универсальную схему исследователи: В.М. Максимов, А.В. Щербаков, А.М. Прохоров и др.

По результатам исследований последнее извержение вулкана Казбек произошло около 6000 лет назад. Находясь всего в 4000–4500 м над промежуточной

магматической камерой вулкана с температурой около 270–300 °С район расположения Нижне-Кармадонского месторождения однозначно подвержен влиянию поствулканических процессов Казбекского вулканического центра.

Вулканические породы здесь представлены в основном андезитовыми и дацитовыми лавами, т. е. продуктами средней магмы. Для областей современного вулканизма с подобным составом вулканогенов исходным типом выделяющихся гидротерм являются Cl-Na растворы, происхождение которых связано с плотными вулканическими парами. Объясняется это тем, что в парах высокой плотности хорошо растворимы хлориды щелочных металлов, кремнезем и рудные минералы. Под влиянием флюидов в конкретной гидрогеологической обстановке образуются нагретые Cl-Na растворы, богатые Li, H₂SiO₃ и H₃BO₃.

Исходя из этого можно сделать вывод, что минеральные воды Нижне-Кармадонского месторождения формируются за счет Cl-Na магматогенных растворов в области разгрузки глубинной гидротермальной системы. Структурно такая гидротермальная система является массивным резервуаром, вмещающим трещинно-жильные холодные и термальные воды, гидравлическая связь между которыми обусловлена различными физико-химическими процессами.

Для района расположения Нижне-Кармадонского месторождения представляется следующая концептуальная модель генезиса и распределения подземных вод в гидротермальной системе.

В пределах возвышенных участков Казбекско-Джигарайского горно-ледникового массива холодные метеорные воды по мощным тектоническим разломам проникают на глубину до 500–1000 м ниже нулевой отметки. В качестве таких водопроводящих разломов можно рассматривать субширотный Адайком-Казбекский и поперечный Казбек-Цхинвальский разломы, пересекающиеся в районе горы Казбек (к юго-востоку от района расположения Нижне-Кармадонского месторождения).

По пути своего движения метеорные воды смешиваются с потоками нагретых вод, пара и газов, восходящими из магматической камеры по зонам проницаемости глубокого заложения. Восходящие потоки, как указано выше, уже изначально состоят из Cl-Na растворов и в значительных количествах содержат Li, H₂SiO₃, H₃BO₃, а также газы: CO₂, O₂, H₂S, N₂ и CH₄.

В результате смешения Cl-Na гидротермальных растворов и метеорных вод формируется общий восходящий поток термальных вод, стремящийся в область разгрузки. Следует отметить, что наличие на месторождении восходящего потока как такового (как минимум с глубины 1300 м от поверхности) было однозначно подтверждено ранее проведенными гидродинамическими и геотермическими исследованиями.

Наиболее благоприятные условия для разгрузки минерализованных вод создаются в местах приподнятых участков кристаллического фундамента в ядрах антиклинальных структур. Для Верхне-Кармадонского месторождения такой структурой является Шаухох-

ская антиклиналь, для Нижне-Кармадонского месторождения – Геналдонская антиклиналь. В пределах данных антиклинальных структур установлены зоны разломов и повышенной трещиноватости пород субмеридионального простирания (и, по-видимому, глубокого заложения), наиболее проявленных по долине р. Геналдон (в основном, вдоль русла). Здесь восходящий поток термальных вод разгружается в аллювиальные отложения, в русло реки и на поверхности в виде источников.

Немаловажную роль здесь сыграли эрозионные процессы, сформировавшие в конце последнего оледенения долину р. Геналдон. Возникновение в данном районе глубокой речной долины – естественной дрены – благоприятствовало разгрузке вод глубокой циркуляции, т. е. формированию собственно месторождения термальных хлоридных натриевых вод.

Ввиду того, что движение вод вниз и вверх осуществляется по тектоническим нарушениям (разломам, зонам дробления и повышенной трещиноватости) разнообразного строения и генезиса, а следовательно, и с разной степенью проницаемости, скорости подземных потоков неравномерны. Данное обстоятельство существенным образом сказывается на химическом составе подземных вод месторождения. В частности, воды с повышенной минерализацией, по-видимому, обладают более замедленным движением, и, наоборот, для слабоминерализованных вод характерны более активные подземные потоки.

Наличие в составе минеральных вод месторождения гидрокарбонатной составляющей обусловлено дальнейшим смешением хлоридных натриевых вод глубокой циркуляции с пресными трещинно-грунтовыми водами преимущественно гидрокарбонатного типа.

Формирование запасов минеральных вод

Как указано выше, формирование запасов (ресурсов) и химического состава минеральных вод происходит в условиях современного водообмена водоносных структур с поверхностью.

Исходя из общих представлений о формировании хлоридных натриевых вод в исследуемом районе допускается, что минеральные воды месторождений имеют общий генезис [3, 4]. При этом очевидно, что воды месторождений несколько различаются между собой по составу и минерализации. Так, воды Верхне-Кармадонских источников относятся к среднеминерализованным и имеют следующий характерный состав:

$$M_{8,5} \frac{Cl \ 86 \ HCO_3 \ 12}{(Na+K)78 \ Ca \ 15}.$$

Воды Нижне-Кармадонского месторождения характеризуются как маломинерализованные, состав их можно описать формулой (скв. № 29-р):

$$M_{3,3} \frac{Cl \ 85 \ HCO_3 \ 15}{(Na+K) \ 93}.$$

Учитывая пространственное положение месторождений, а именно последовательное их расположение сверху вниз по долине р. Геналдон на расстоянии

8,5 км друг от друга, допускается влияние вод Верхне-Кармадонского месторождения (с большей минерализацией) на химический состав вод Нижне-Кармадонского месторождения. В то же время в «окончательном» формировании химического состава вод месторождений участвуют ультрапресные ледниковые воды, пресные воды реки Геналдон, а также трещинно-грунтовые воды юрских отложений. Учитывая эти факторы, в количественном отношении ресурсы подземных вод месторождений можно определить по соотношениям дебитов (расходов) и минерализации поверхностных и подземных вод при их смешении на участках разгрузки.

Верхне-Кармадонское месторождение. Непосредственно на выходе из ледника Майли химический состав воды в р. Геналдон выражается формулой:

$$M_{0,7} \frac{Cl \ 41 \ HCO_3 \ 41}{Ca \ 47 \ (Na+K)40}$$

Повышенная (в сравнении с общим фоном) минерализация воды в р. Геналдон на выходе из ледника ($0,7 \text{ г/дм}^3$) свидетельствует о наличии мощного очага разгрузки минерализованных вод под ледником. Кроме того, в зимнее время иногда можно видеть клубы пара, выходящие из трещин ледника. Учитывая минерализацию ледника Майли и значение минерализации Верхне-Кармадонских источников ($8,5 \text{ г/дм}^3$) за минерализацию подледникового очага разгрузки, расход подледникового очага разгрузки минеральных вод:

$$M_{Г,и} \cdot Q_{Г,и} = M_p \cdot Q_{р,вк} + M_{л} \cdot (Q_{Г,и} - Q_{р,вк}),$$

где $M_{Г,и}$ – минерализация воды в истоке р. Геналдон, $0,7 \text{ г/дм}^3$; $Q_{Г,и}$ – расход воды в истоке р. Геналдон, $800 \text{ дм}^3/\text{с}$ (или $0,8 \text{ м}^3/\text{с}$); M_p – средняя минерализация подледникового очага разгрузки, $8,5 \text{ г/дм}^3$; $Q_{р,вк}$ – расход подледникового очага разгрузки (искомая величина), $\text{дм}^3/\text{с}$; $M_{л}$ – минерализация ледника Майли (в левой части языка), $0,008 \text{ г/дм}^3$.

Таким образом:

$$0,7 \cdot 800 = 8,5 \cdot Q_{р,вк} + 0,008 \cdot (800 - Q_{р,вк}),$$

отсюда расход подледникового очага разгрузки минеральных вод, определяющего ресурсный потенциал Верхне-Кармадонского месторождения, составляет:

$$Q_{р,вк} = 65,2 \text{ дм}^3/\text{с} \approx 5600 \text{ м}^3/\text{сут.}$$

Нижне-Кармадонское месторождение. Способом аналогичным вышеприведенному рассчитывается примерный расход очага разгрузки подземных вод (прогнозные ресурсы) на участке р. Геналдон в створе Нижне-Кармадонского месторождения. Здесь при смешении вод учитываются пресные трещинно-грунтовые воды нижнеюрских отложений и вод р. Геналдон. Формула смешения вод при этом имеет вид:

$$M_{Г,нк} \cdot Q_{Г,нк} = M_{нк} \cdot Q_{р,нк} + M_{Г,т} \cdot (Q_{Г,нк} - Q_{р,нк}),$$

где $M_{Г,нк}$ – минерализация воды в р. Геналдон в створе Нижне-Кармадонского месторождения, $0,47 \text{ г/дм}^3$; $Q_{Г,нк}$ – расход воды в р. Геналдон в створе месторождения, $2690 \text{ дм}^3/\text{с}$ (или $2,69 \text{ м}^3/\text{с}$); $M_{нк}$ – минерализация воды месторождения (принимается по скв. № 29-р), $3,4 \text{ г/дм}^3$; $Q_{р,нк}$ – расход очага разгрузки на площа-

ди месторождения (искомая величина), $\text{дм}^3/\text{с}$; $M_{Г,т}$ – средняя минерализация трещинно-пластовых вод, $0,22 \text{ г/дм}^3$.

Таким образом:

$$0,47 \cdot 2690 = 3,4 \cdot Q_{р,нк} + 0,22 \cdot (2690 - Q_{р,нк}),$$

отсюда:

$$Q_{р,нк} = 211,5 \text{ дм}^3/\text{с} \approx 18200 \text{ м}^3/\text{сут.}$$

Ввиду того, что вышеприведенные расчеты искомой величины подземной разгрузки основаны на данных разновременных наблюдений, они носят, безусловно, приблизительный характер. Для получения более представительной информации о ресурсном потенциале Верхне- и Нижне-Кармадонского месторождений минеральных вод в данном районе требуется организация специальных гидрологических, гидрогеологических и гидрохимических наблюдений.

Группа сложности участка недр

Район расположения Нижне-Кармадонского месторождения минеральных вод приурочен к восточной окраине Центрально-Кавказской гидрогеологической складчатой области. Данный район характеризуется наличием сложных горно-складчатых сооружений с бассейнами трещинно-грунтовых и трещинно-жильных вод зон тектонических нарушений и контактов.

В соответствии с «Классификацией запасов и прогнозных ресурсов питьевых, технических и минеральных подземных вод», по сложности геологического строения и гидрогеологических условий оцениваемого участка недр можно отнести ко второй группе сложности.

Источники формирования запасов Нижне-Кармадонского месторождения по данным разведки (1957–1963 гг.) и участка недр ООО «Ариана» по данным геологического изучения (2014–2015 гг.) определены частично. Так как участок недр ООО «Ариана» расположен в пределах ранее разведанного месторождения, при переоценке его запасов могут быть выделены запасы категории В.

Результаты определения запасов подземных вод и их категоризация

Как указывалось выше, Нижне-Кармадонское месторождение минеральных вод детально разведано конец XX в. Запасы минеральных вод утверждены ГКЗ СССР в количестве $2200 \text{ м}^3/\text{сут}$ по категории А без ограничения срока эксплуатации.

Согласно техническому (геологическому) заданию целью проведения настоящих работ являлась переоценка запасов минеральных вод Нижне-Кармадонского месторождения на участке ООО «Ариана».

Исходя из перспективной потребности недропользователя максимальный уровень добычи минеральных вод на участке ограничен величиной $360 \text{ м}^3/\text{сут}$.

Обоснование запасов минеральных вод участка производилось по скважинам № 27 и 29-р. Подсчет запасов осуществлялся гидравлическим методом, исходя из средней величины дебитов скважин при свободном самоизливе.

Средний дебит скважин определялся по данным периодических ежемесячных замеров, проведенных в течение одного года, в 2018–2019 гг. (табл. 1).

Таблица 1. Дебиты скважин № 27 и 29-р (в $\text{дм}^3/\text{с}$) в 2018–2019 гг.

Table 1. Flow rates of wells no. 27 and 29-r (in dm^3/s) in 2018–2019

| Дата/Date | Скважина №/Well no. | |
|------------|---------------------|------|
| | 27 | 29-р |
| 17.10.2018 | 0,68 | 1,11 |
| 30.11.2018 | 0,70 | 1,04 |
| 17.01.2018 | 0,67 | 1,14 |
| 28.02.2019 | 0,71 | 1,18 |
| 29.03.2019 | 0,73 | 1,07 |
| 30.04.2019 | 0,72 | 1,05 |
| 30.05.2019 | 0,69 | 1,03 |
| 28.06.2019 | 0,68 | 1,05 |
| 25.07.2019 | 0,67 | 1,06 |
| 28.08.2019 | 0,67 | 1,08 |
| 30.09.2019 | 0,68 | 1,08 |
| 17.10.2019 | 0,68 | 1,10 |

Так как в течение всего этого периода скважины работали в режиме «минеральные воды самоизлива-

Таблица 2. Сведения о запасах подземных вод участка

Table 2. Information on groundwater reserves of the site

| Тип воды Water type | Водоносный горизонт, интервал каптажа Aquifer, capturing interval | Минерализация, $\text{г}/\text{дм}^3$ Mineralization, g/dm^3 | Биологически активные компоненты, содержание, $\text{мг}/\text{дм}^3$ Biologically active components, content, mg/dm^3 | Запасы $\text{м}^3/\text{сут}$ по категории «В» Stocks m^3/day for category «B» | № скважин, обосновывающих запасы No. of wells substantiating reserves |
|--|---|---|---|--|--|
| Хлоридная (гидрокарбонатно-хлоридная) натриевая, борная, термальна́я, минеральная Chloride (hydrocarbonate-chloride) sodium, boric, thermal mineral | Водоносный комплекс нижнеюрских отложений J_1 ; 330–817 м Water-bearing complex of Lower Jurassic deposits J_1 ; 330–817 m | 3,2...5,7 | Ортоборная кислота (H_3BO_3), 146–277 Orthoboric acid (H_3BO_3), 146–277 | 152,0 | 27; 29-р |

Таблица 3. Распределение минеральных вод участка по гидрохимическим типам

Table 3. Distribution of mineral waters of the site by hydrochemical types

| № скважин Well no. | Минерализация воды, $\text{г}/\text{дм}^3$ Water mineralization, g/dm^3 | Гидрохимический тип вод по ГОСТ Р 54316-2011 Hydrochemical type of water according to SS R 54316-2011 | Запасы, $\text{м}^3/\text{сут}$ Reserves, m^3/day |
|-----------------------|--|--|--|
| 29-р | 3,3...3,6 | Кармадонский/Karmadon | 59 |
| 27 | 5,4...5,7 | Кармадонский, Урс-Донский Karmadon, Urs-Donskin | 93 |

Полученная величина суммарного эксплуатационного дебита скважин не в полной мере отражает запасы минеральных вод участка. Нижне-Кармадонское месторождение было разведано в пределах узкой полосы вдоль р. Геналдон на протяжении 1250 м. Протяженность участка недр ООО «Ариана» (обусловленная расстоянием между скважинами № 27 и 29-р) составляет 210 м. Следовательно, охватывая около 17 % площади Нижне-Кармадонского месторождения, оцениваемый участок недр изначально обладает значительной частью разведанных запасов минеральных вод.

ются» (закрывались только на время проведения гидрогеологических исследований), регулярные замеры дебита рассматриваются как наблюдения в процессе опытно-эксплуатационных выпусков продолжительностью 12 месяцев.

Из табл. 1 следует, что средний дебит по скважинам составил:

- для скважины № 27: 0,69 $\text{дм}^3/\text{с}$; 59,6 $\text{м}^3/\text{сут}$;
- для скважины № 29-р: 1,08 $\text{дм}^3/\text{с}$; 93,3 $\text{м}^3/\text{сут}$.

Таким образом, определены запасы термальной минеральной питьевой лечебной воды по участку недр ООО «Ариана» Нижне-Кармадонского месторождения, расположенного в Пригородном районе Республики Северная Осетия–Алания в количестве 152 $\text{м}^3/\text{сут}$.

Запасы отнесены к категории В (разведанным) и предусматриваются на 25-летний расчетный срок эксплуатации. В табл. 2 приведены сведения о запасах подземных вод участка.

Исходя из особенностей химического состава общие запасы участка распределяются по скважинам следующим образом (табл. 3).

Анализ информации по скважинам № 27 и 29-р показывает, что по результатам ранних опытно-эксплуатационных выпусков средние дебиты скважин составляли:

- скв. № 27 – 12,84 $\text{дм}^3/\text{с}$;
- скв. № 29-р – 5,75 $\text{дм}^3/\text{с}$.

Следовательно, суммарная среднесуточная производительность скважин за исследованный период составляла 1605 $\text{м}^3/\text{сут}$ (т. е. более чем в 10 раз выше предыдущей).

Таким образом, резкое уменьшение дебитов скважин не связано с ресурсным потенциалом месторождения, а является следствием повреждения скважин селевой массой во время катастрофического схода ледника Колка 20 сентября 2002 г. В перспективе допускается возможность получения дополнительных запасов минеральных вод на участке за счет бурения новой скважины (ремонт существующих скв. № 27 и 29-р с целью увеличения их дебитов не представляется возможным из-за недоступности скважин для буровой техники).

Исходя из величины постоянной разгрузки минеральных вод на площади Нижне-Кармадонского месторождения в количестве 18–200 $\text{м}^3/\text{сут}$, можно сде-

лать вывод, что переоцененные запасы минеральных вод участка недр ООО «Ариана» вполне обеспечены источниками формирования.

Предложения по организации и ведению мониторинга состояния недр

С целью получения своевременной достоверной информации, необходимой для принятия оперативных решений по обеспечению рационального использования минеральных вод участка, контроля за их состоя-

нием под воздействием техногенных и природных факторов, предусматривается объектный мониторинг подземных вод [16–20] по прилагаемой схеме (табл. 4).

Фиксация данных мониторинга минеральных вод ведётся в специальном журнале режимных наблюдений, где также должны быть отражены результаты работ по ремонту скважины, отбора проб воды на химические и бактериологические анализы. Рекомендуемая форма журнала наблюдений прилагается в табл. 5.

Таблица 4. Схема объектного мониторинга минеральных подземных вод на участке

Table 4. Scheme of object monitoring of mineral groundwater at the site

| Объект наблюдения Observation object | Пункты наблюдения Observation points | Наблюдаемые показатели Observed indicators | Способ измерения Measurement method | Периодичность Periodicity |
|--|---|---|--|---|
| Эксплуатируемый водоносный комплекс с ₁ Exploited aquifer J ₁ | Скважины № 27 и 29-р Wells no. 27 and 29-r | Дебит Flow rate | Объемный Volume | 1 раз в месяц once a month |
| | | Уровень воды Water level | По манометру By pressure gauge | |
| | | Температура воды Water temperature | Термометром Thermometer | |
| | | Контроль качества отбираемой воды Quality control of the taken water | По программе производственного контроля качества According production quality control program | 3 раза в год на типовой (сокращенный) хим. анализ воды; 1 раз в год на полный хим. анализ воды; 4 раза в год на баканализ воды 3 times a year for a typical (reduced) chemical analysis of water; once a year for a complete chemical analysis of water; 4 times a year for water analysis |
| Техническое состояние Technical condition | Скважины № 27 и 29-р Wells no. 27 and 29-r | Состояние ствола скважины, устьевой обвязки, павильона и т. д. The condition of the wellbore, wellhead connection, pavilion, etc. | | 1 раз в год once a year |
| Зона строго режима High security zone | Участок недр Subsoil plot | Потенциальные источники загрязнения; установленный регламент хозяйственной деятельности в зоне строгого режима Potential sources of pollution; established regulations for economic activity in a strict regime zone | Визуальный осмотр Visual | 1 раз в год once a year |

Таблица 5. Форма журнала для проведения режимных наблюдений на участке

Table 5. Form of the journal for conducting regime observations at the site

| Дата замера Measurement date | Время замера Measurement time | Температура, °С Temperature, °С | | Дебит скважины Well flow rate | | | Уровень воды по манометру, м Water level according to manometer, m | № пробы, вид анализа, ремонтно-профилактические работы Sample number, type of analysis, repair and maintenance work |
|---------------------------------|----------------------------------|------------------------------------|----------------|--|--|--|---|--|
| | | воды water | воздуха air | объем измерительного сосуда measuring vessel volume | время наполнения, с filling time, s | дебит, дм ³ /с flow rate, dm ³ /s | | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 10 |

Заключение

За период исследований проведены работы по определению количества минеральных вод участка недр в южной части Нижне-Кармадонского месторождения.

В настоящее время на участке находятся две действующие скважины: № 27 и 29-р.

В комплекс гидрогеологических исследований вошли: изучение экспериментальных материалов; изучение режима подземных вод; отбор проб; лабораторные исследования.

В процессе работ охарактеризовано современное качество подземных вод целевого водоносного комплекса, оценены условия естественной защищенности подземных вод.

В структурно-тектоническом отношении оцениваемый участок недр приурочен к зоне Северного склона (структура II порядка), входящей в состав антиклинория Большого Кавказа (структура I порядка). Непосредственно геологическое строение участка обуславливает Геналдонская антиклиналь (структура III порядка), сложенная нижнеюрскими отложениями, нарушенная Кауридонским, Нижне-Кармадонским и Тагаурским разломами субширотного простирания с крутым падением на юг. В пределах антиклинали породы развиты субмеридионально-поперечные трещины разрыва, являющиеся основными путями циркуляции минеральных вод.

В гидрогеологическом отношении участок приурочен к восточному краю Центрально-Кавказской

гидрогеологической складчатой области с бассейнами трещинно-пластовых и трещинно-жильных вод. Циркуляция минеральных вод и их разгрузка происходят по разломам и трещинам субмеридианального направления.

Целевым гидростратиграфическим таксоном является водоносный комплекс трещинно-жильных вод нижнеюрских отложений. Питание массива осуществляется за счет атмосферных осадков на ледниках и снежниках Казбекско-Джидарайского массива. Разгрузка происходит в аллювий или в р. Геналдон.

В соответствии с «Классификацией запасов и прогнозных ресурсов питьевых, технических и минеральных подземных вод», по сложности геологического строения и гидрогеологических условий оцениваемый участок недр можно отнести ко второй группе сложности.

Гидрорежимные наблюдения на участке проведены в 2014–2015 гг. Получены следующие данные:

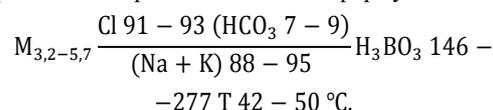
- в скважине № 27: избыточный напор – до +285 м; средний дебит – до 0,69 дм³/с; температура воды – до 50 °С;
- в скважине № 29-р: избыточный напор – до +400 м (расчетное значение); дебит – 1,08 дм³/с; температура – до 45 °С.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Assessment of exploitation reserves of Nabeghlavi mineral water deposit / A. Jgamadzea, J. Gabechavaa, V. Gvakhariaa, D. Sozashvilia, B. Lebanidzea, T. Jebashvilia, A. Maglakelidzea // *Annals of Agrarian Science*. – 2018. – V. 16. – P. 352–356.
2. Ga plume associated VHMS mineralization in the Eastern Goldfields Superterrane, Yilgarn Craton: Insights from the low temperature and shallow water, Ag-Zn-(Au) Nimbus deposit / S.P. Hollis, D.R. Mole, P. Gillespie, S.J. Barnes, R.A.F. Cas, C. Hildrew, A. Pumphrey, M.D. Goodz, S. Caruso, C.J. Yeats, A. Verbeeten, S.M. Belford, S. Wyche, L.A.J. Martin // *Precambrian Research*. – 2017. – V. 291. – P. 119–142.
3. Geology and hydrogeochemistry of the thermo-mineral waters of the South Rif Thrust (Northern Morocco) / K. Sabri, R. Marrero-Diaz, A. Ntarmouchant, T.B. dos Santos, M.L. Ribeiro, A.R. Solá, H. Smaili, A. Benslimane, M. Chibout, N.M. Pérez, E. Padrón, G.V. Melián, M. Asensio-Ramos, P.M. Carreira, A.P. Jesus // *Geothermics*. – 2019. – V. 78. – P. 28–49.
4. Comparative geochemical study between the tap waters and the bottled mineral waters in Calabria (Southern Italy) by compositional data analysis (CoDA) developments / C. Apollaro, A. Buccianti, G. Vespasiano, M. Vardè, I. Fuoco, D. Barca, A. Bloise, D. Miriello, F. Cofone, A. Servidio, R. De Rosa // *Applied Geochemistry*. – 2019. – V. 107. – P. 19–33.
5. Determining the recharge sources and circulation depth of thermal waters in Xianyang geothermal field in Guanzhong Basin: The controlling role of Weibei Fault / Lu Luo, Z. Pang, J. Liu, Sh. Hu, S. Rao, Y. Li, L. Lu // *Geothermics*. – 2017. – V. 69. – P. 55–64.
6. Hebblewhite B. Fracturing, caving propagation and influence of mining on groundwater above longwall panels—a review of predictive models // *International Journal of Mining Science and Technology*. – 2020. – V. 30. – P. 49–54.
7. Alakangas L.J., Mathurin F.A., Åström M.E. Diverse fractionation patterns of Rare Earth Elements in deep fracture groundwater in the Baltic Shield – progress from utilisation of Diffusive Gradients in Thin-films (DGT) at the Äspö Hard Rock Laboratory // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 2020. – V. 269. – P. 15–38.
8. Zhan Sh., Wang T., Jeng F. Fracture characterization using hydrogeological approaches and measures taken for groundwater inrush mitigation in shaft excavation // *Tunnelling and Underground Space Technology*. – 2018. – V. 82. – P. 554–567.

Главной причиной резкого уменьшения дебита скважин, безусловно, является их повреждение ледово-грязекаменной массой во время катастрофического схода ледника Колка 20 сентября 2002 г.

Обобщенный химический состав воды участка в современный период описывается формулой:



Сравнение современных результатов исследования с особенностями химического состава минеральных вод и ранее проведенными исследованиями свидетельствует о стабильности показателей состава и свойств минеральных вод.

Проведен комплексный анализ химического состава минеральных вод Нижне-Кармадонского месторождения, и определены физико-химические и лечебные свойства минеральных вод месторождения.

Исходя из величины постоянной разгрузки минеральных вод на площади Нижне-Кармадонского месторождения в количестве 18200 м³/сут, запасы минеральных вод участка вполне обеспечены источниками формирования.

9. Improving estimates of groundwater velocity in a fractured rock borehole using hydraulic and tracer dilution methods / C.H. Maldaner, P.M. Quinn, J.A. Cherry, B.L. Parker // *Journal of Contaminant Hydrology*. – 2018. – V. 214. – P. 75–86.
10. Fang H., Zhu J. Simulation of groundwater exchange between an unconfined aquifer and a discrete fracture network with laminar and turbulent flows // *Journal of Hydrology*. – 2018. – V. 562. – P. 468–476.
11. Improving the energy efficiency of technological equipment at mining enterprises / R. Klyuev, I. Bosikov, O. Gavrina, M. Madaeva, A. Sokolov // *Advances in Intelligent Systems and Computing*. – 2021. – V. 1258. – P. 262–271.
12. Оценка горно-геологических и горнотехнических условий карьера «Северный» с помощью математических моделей / Р.В. Клюев, И.И. Босиков, Е.В. Егорова, О.А. Гаврина // *Устойчивое развитие горных территорий*. – 2020. – № 3. – С. 418–427. DOI: 10.21177/1998-4502-2020-12-3-418-427.
13. Комплексный анализ применения эффективных технологий для повышения устойчивого развития природно-технической системы / Р.В. Клюев, И.И. Босиков, А. В. Майер, О.А. Гаврина // *Устойчивое развитие горных территорий*. – 2020. – № 2. – С. 283–290.
14. Metal deposits combined development experience / V. Golik, V. Komashchenko, V. Morkun, O. Burdzieva // *Metallurgical and Mining Industry*. – 2015. – V. 7. – № 6. – P. 591–594.
15. Голик В.И., Разоренов Ю.И., Каргинов К.Г. Основа устойчивого развития РСО-Алания – горнодобывающая отрасль // *Устойчивое развитие горных территорий*. – 2017. – № 2. – С. 163–172.
16. Quantitative decision making for a groundwater monitoring and subsurface contamination early warning network / H. Li, J. Gu, A. Hanif, A. Dhanasekar, K. Carlson // *Science of The Total Environment*. – 2019. – V. 683. – P. 498–507.
17. Statistical modelling of groundwater contamination monitoring data: a comparison of spatial and spatiotemporal methods / M.I. McLean, L. Evers, A.W. Bowman, M. Bonte, W.R. Jones // *Science of The Total Environment*. – 2019. – V. 652. – P. 1339–1346.
18. Groundwater quality monitoring network design and optimisation based on measured contaminant concentration and taking solute transit time into account / J. Farlin, T. Gallé, D. Pittois, M. Bayerle, T. Schaul // *Journal of Hydrology*. – 2019. – V. 573. – P. 516–523.
19. Ayvaz M.T., Elçi A. Identification of the optimum groundwater quality monitoring network using a genetic algorithm based

optimization approach // Journal of Hydrology. – 2018. –V. 563. – P. 1078–1091.

20. Mi Lin, Biswas A., Bennett E.M. Identifying hotspots and representative monitoring area of groundwater changes with time

stability analysis // Science of The Total Environment. – 2019. – V. 667. – P. 419–426.

Поступила 18.02.2021 г.

Информация об авторах

Клюев Р.В., доктор технических наук, профессор кафедры техники низких температур им. П.Л. Капицы Московского политехнического университета.

Голик В.И., доктор технических наук, профессор кафедры технологии разработки месторождений Северо-Кавказского горно-металлургического института (государственного технологического университета).

Босиков И.И., кандидат технических наук, доцент кафедры прикладной геологии Северо-Кавказского горно-металлургического института (государственного технологического университета).

UDC 556.3

COMPREHENSIVE ASSESSMENT OF HYDROGEOLOGICAL CONDITIONS FOR FORMATION OF MINERAL WATER RESOURCES OF THE NIZHNE-KARMADON DEPOSIT

Roman V. Klyuev¹,
kluev-roman@ramler.ru

Vladimir I. Golik²,
v.i.golik@mail.ru

Igor I. Bosikov²,
igor.boss.777@mal.ru

¹ Moscow Polytechnic University,
33, B. Semenovskaya street, Moscow, 107023, Russia.

² North Caucasian Institute of mining and metallurgy (State Technological University),
44, Nikolaev street, Vladikavkaz, 362021, Russia.

Relevance. For many centuries, mankind has been using the sources of healing waters. Mineral water is used for both treatment and prophylaxis. Moreover, its healing properties were manifested with widespread use. Already starting from the XV century BC Indian Vedas gave an idea of the unique properties of mineral waters. Water from mineral and fresh sources was used for hygiene and healing purposes in the Ancient World, in particular in Egypt, Babylon, Assyria. It should be noted that groundwater has always been highly appreciated. The research is caused by the need for a comprehensive study of the Nizhne-Karmadon field to replenish mineral water reserves in the Russian Federation.

The main aim of the research is the comprehensive analysis of chemical composition of mineral waters of the Nizhne-Karmadon deposit and determining the physicochemical and medicinal properties of the mineral waters of the deposit.

Objects: mineral waters of the Genaldon gorge, Nizhne-Karmadon deposit, Kazbek-Dzhimarai massif.

Methods: structural-tectonic method, analogy method, modeling method, geophysical methods – thermal logging of wells, facies analysis method, geomorphological method, subsoil geometrization method. The geothermal conditions of the subsoil area were assessed by measuring the water temperature at the wellheads.

Results. According to the studies carried out, according to GOST R 54316-2011 and «The main criteria for the chemical composition of mineral waters», the waters of the deposit are low and medium mineralized, sodium chloride, boric, high thermal. In terms of physical, chemical and medicinal properties, the mineral waters of the subsoil area of LLC Ariana are recommended for medicinal and drinking purposes in accordance with the attached medical indications. Based on the value of the constant discharge of mineral waters in the area of the deposit in the amount of 18,200 m³/day, the mineral water reserves of the site are fully provided with sources of formation.

Key words:

Thermal mineral and sodium chloride waters, zones of faults and fractures, field, complex of fractured-vein waters, thermal logging studies of wells, fault zones, cracks.

REFERENCES

- Jgamadzea A., Gabechavaa J., Gvakhariaa V., Sozashvilia D., Lebanidzea B., Jebashvilia T., Maglakelidzea A. Assessment of exploitation reserves of Nabeghlavi mineral water deposit. *Annals of Agrarian Science*, 2018, vol. 16, pp. 352–356.
- Hollis S.P., Mole D.R., Gillespie P., Barnes S.J., Cas R.A.F., Hildrew C., Pumphrey A., Goodz M.D., Caruso S., Yeats C.J., Verbeeten A., Belford S.M., Wyche S., Martin L.A.J. 2.7 Ga plume associated VHMS mineralization in the Eastern Goldfields Superterrane, Yilgarn Craton: Insights from the low temperature and shallow water, Ag-Zn-(Au) Nimbus deposit. *Precambrian Research*, 2017, vol. 291, pp. 119–142.
- Sabri K., Marrero-Diaz R., Ntarmouchant A., Bento dos Santos T., Ribeiro M.L., Solá A.R., Smaili H., Benslimane A., Chibout M., Pérez N.M., Padrón E., Melián G.V., Asensio-Ramos M., Carreira P.M., Jesus A.P. Geology and hydrogeochemistry of the thermo-mineral waters of the South Rif Thrust (Northern Morocco). *Geothermics*, 2019, vol. 78, pp. 28–49.
- Apollaro C., Buccianti A., Vespasiano G., Vardè M., Fuoco I., Barca D., Bloise A., Miriello D., Cofone F., Servidio A., De Rosa R. Comparative geochemical study between the tap waters and the bottled mineral waters in Calabria (Southern Italy) by compositional data analysis (CoDA) developments. *Applied Geochemistry*, 2019, vol. 107, pp. 19–33.
- Luo Lu, Pang Z., Liu J., Hu Sh., Rao S., Li Y., Lu L. Determining the recharge sources and circulation depth of thermal waters in Xianyang geothermal field in Guanzhong Basin: the controlling role of Weibei Fault. *Geothermics*, 2017, vol. 69, pp. 55–64.
- Hebblewhite B. Fracturing, caving propagation and influence of mining on groundwater above longwall panels – a review of predictive models. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2020, vol. 30, pp. 49–54.
- Alakangas L.J., Mathurin F.A., Åström M.E. Diverse fractionation patterns of Rare Earth Elements in deep fracture groundwater in the Baltic Shield – progress from utilisation of Diffusive Gradients in Thin-films (DGT) at the Äspö Hard Rock Laboratory. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2020, vol. 269, pp. 15–38.
- Zhan Sh., Wang T., Jeng F. Fracture characterization using hydrogeological approaches and measures taken for groundwater intrusion mitigation in shaft excavation. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2018, vol. 82, pp. 554–567.
- Maldaner C.H., Quinn P.M., Cherry J. A., Parker B. L. Improving estimates of groundwater velocity in a fractured rock borehole using hydraulic and tracer dilution methods. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2018, vol. 214, pp. 75–86.
- Fang H., Zhu J. Simulation of groundwater exchange between an unconfined aquifer and a discrete fracture network with laminar and turbulent flows. *Journal of Hydrology*, 2018, vol. 562, pp. 468–476.
- Klyuev R., Bosikov I., Gavrina O., Madaeva M., Sokolov A. Improving the energy efficiency of technological equipment at mining enterprises. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2021, vol. 1258, pp. 262–271.

12. Klyuev R.V., Bosikov I.I., Egorova E.V., Gavrina O.A. Assessment of mining-geological and mining technical conditions of the Severny pit with the use of mathematical models. *Sustainable Development of Mountain Territories*, 2020, no. 3, pp. 418–427. In Rus. DOI: 10.21177/1998-4502-2020-12-3-418-427.
13. Klyuev R.V., Bosikov I.I., Mayer A.V., Gavrina O.A. Comprehensive analysis of the effective technologies application to increase sustainable development of the natural-technical system. *Sustainable Development of Mountain Territories*, 2020, no. 2, pp. 283–290. In Rus.
14. Golik V., Komashchenko V., Morkun V., Burdzieva O. Metal deposits combined development experience. *Metallurgical and Mining Industry*, 2015, vol. 7, no. 6, pp. 591–594.
15. Golik V.I., Razorenov Yu.I., Karginov K.G. The basis of sustainable development of North Ossetia-Alania is the mining industry. *Sustainable development of mountain territories*, 2017, no. 2 (32), pp. 163–172. In Rus.
16. Li H., Gu J., Hanif A., Dhanasekar A., Carlson K. Quantitative decision making for a groundwater monitoring and subsurface contamination early warning network. *Science of The Total Environment*, 2019, vol. 683, pp. 498–507.
17. McLean M.I., Evers L., Bowman A.W., Bonte M., Jones W.R. Statistical modelling of groundwater contamination monitoring data: a comparison of spatial and spatiotemporal methods. *Science of The Total Environment*, 2019, vol. 652, pp. 1339–1346.
18. Farlin J., Gallé T., Pittois D., Bayerle M., Schaul T. Groundwater quality monitoring network design and optimisation based on measured contaminant concentration and taking solute transit time into account. *Journal of Hydrology*, 2019, vol. 573, pp. 516–523.
19. Ayvaz M.T., Elçi A. Identification of the optimum groundwater quality monitoring network using a genetic algorithm based optimization approach. *Journal of Hydrology*, 2018, vol. 563, pp. 1078–1091.
20. Lin Mi, Biswas A., Bennett E. M. Identifying hotspots and representative monitoring area of groundwater changes with time stability analysis. *Science of The Total Environment*, 2019, vol. 667, pp. 419–426.

Received: 18 February 2021.

Information about the authors

Roman V. Klyuev, Dr. Sc., professor, Moscow Polytechnic University.

Vladimir I. Golik, Dr. Sc., professor, North Caucasian Institute of mining and metallurgy (State Technological University).

Igor I. Bosikov, Cand. Sc., assistant professor, North Caucasian Institute of mining and metallurgy (State Technological 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

Дата выхода 30.08.2021. Формат 60x84/8. Бумага «Снегурочка».
Печать XEROX. Усл. печ. л. 25,47. Уч.-изд. л. 23,04.
Заказ 151-21. Тираж 500 экз. Цена 1020 руб.



Издательство

ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Адрес учредителя, редакции, издателя, типографии:
634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.