



**ТОМСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ**

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

**ИЗВЕСТИЯ
ТОМСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
ИНЖИНИРИНГ ГЕОРЕСУРСОВ**

Том 335, № 8, 2024

Издательство
Томского политехнического университета
2024

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

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

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

Подписной индекс в объединённом каталоге «Пресса России» – 18054

© ФГАОУ ВО НИ ТПУ, 2024

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 (Роскомнадзор) – Свидетельство ПИ № ФС 77-65008 от 04.03.2016 г.

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

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

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

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

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

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

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

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

Окончательное решение по публикации статьи принимает главный редактор журнала.

Все материалы размещаются в журнале на бесплатной основе.

Журнал издается ежемесячно.

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



**TOMSK
POLYTECHNIC
UNIVERSITY**

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

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

Volume 335, № 8, 2024

EDITORIAL BOARD

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

AIMS AND SCOPES

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

The journal was founded in 1903.

The journal is registered internationally (ISSN 2413-1830) and nationally (Certificate PE no. FM 77-65008, March 04, 2016 from the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology and Mass Media (Roskomnadzor)).

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

- Разработка тампонажных растворов с добавками частиц наноглины для строительства нефтяных скважин в условиях повышенных температур**
Нуцкова М.В., Алхаззаа М.
- Сорбционные свойства сорбента, полученного путем модифицирования оксигидроксида алюминия ионами серебра, на модельных растворах**
Мачехина К.И., Грязнова Е.Н., Абрамова П.В., Пуставалов А.В., Мирошниченко Ю.Ю.
- Эффективная технология изготовления электротехнической керамики из маложелезистых диопсидовых пород**
Горбачев Д.В., Верещагин В.И., Рот Л.О.
- Геохимические критерии золотоносности кор выветривания Томь-Яйского междуречья**
Ворошилов В.Г., Тимкин Т.В., Савинова О.В., Молукпаева Д.К.
- Комплексное обоснование допустимой погрешности при выполнении гидравлического расчета системы поддержания пластового давления**
Илюшин П.Ю., Вяткин К.А., Козлов А.В.
- Оценка напряжений на поверхности эксплуатационных колонн, оснащенных противопесочными фильтрами, при спуске в горизонтальную скважину**
Хабибуллин М.Я.
- Рациональный частотный диапазон и критерии диагностирования зон эндогенных пожаров в породугольных массивах методом георадиолокации**
Простов С.М., Калайгорода В.В., Шабанов Е.А.
- Минеральный состав донных отложений озера Сабакты как индикатор палеоклимата, Южный Урал, Россия**
Юсупова А.Р., Нургалиева Н.Г., Рогов А.М.
- Анализ прихвата трубы при бурении скважин в южно-иракских коллекторах известняка и песчаника**
Ал-обаиди С.С., Харламов С.Н.
- Повышение эффективности коагуляции в резонансных промежутках за счет формирования акустических течений**
Хмелев В.Н., Нестеров В.А., Шалунов А.В., Терентьев С.А.
- Дендрогеохимия Hg по данным изучения сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris*) на территории Томского района**
Ляпина Е.Е., Шанг Л.Т.Х., Крачнакова М.Г., Барановская Н.В., Маркелова А.Н., Золотов С.Ю.
- Влияние вторичных процессов на петрофизические свойства песчаной породы танопчинской свиты Тамбейского месторождения (Ямало-Ненецкий автономный округ)**
Жданова Ю.Ю.
- Геотектоническая модель глубинного строения Змеиногорского рудного района Рудного Алтая по данным геологической интерпретации комплекса геофизических съемок**
Егоров А.С., Калинин Д.Ф., Секерина Д.Д.
- Development of cement slurries with additives of nanoclay particles for the construction of oil wells at elevated temperatures**
Nutskova M.V., Alhazzaa M.
- Sorption properties of the sorbent obtained by modifying aluminum oxyhydroxide with silver ions on model solutions**
Machekhina K.I., Gryaznova E.N., Abramova P.V., Pustavalov A.V., Miroshnichenko Yu.Yu.
- Efficient technology for manufacturing electrical ceramics from low-iron diopside rocks**
Gorbachev D.V., Vereshchagin V.I., Root L.O.
- Geochemical criteria of the gold content of the Tom-Yaya interfluvial weathering crusts**
Voroshilov V.G., Timkin T.V., Savinova O.V., Molukpaeva D.K.
- Comprehensive justification of the errors at hydraulic calculation of the reservoir pressure maintenance system**
Ilyushin P.Yu., Vyatkin K.A., Kozlov A.V.
- Evaluation of stresses on the surface of production columns equipped with sand filters when downing into a horizontal well**
Khabibullin M.Ya.
- Rational frequency range and criteria for diagnosing endogenous fire zones in coal massifs by using the georadiolocation method**
Prostov S.M., Kalaygoroda V.V., Shabanov E.A.
- Mineral composition of lake Sabakty sediments as an indicator of paleoclimate, Southern Urals, Russia**
Yusupova A.R., Nurgalieva N.G., Rogov A.M.
- Analysis of pipe sticking at well drilling in the South Iraqi limestone and sandstone reservoirs**
Al-obaidi S.S., Kharlamov S.N.
- Increasing the efficiency of coagulation in resonant gaps due to acoustic flow formation**
Khmelev V.N., Nesterov V.A., Shalunov A.V., Terentyev S.A.
- Dendrogeochemistry of Hg according to the study of Scots pine (*Pinus sylvestris*) in the Tomsk region**
Lyapina E.E., Shang L.T.H., Krachnakova M.G., Baranovskaya N.V., Markelova A.N., Zolotov S.Yu.
- Effect of secondary processes on the petrophysical properties of sand rock of the tanopchin formation of the Tambey field (Yamalo-Nenets autonomous okrug)**
Zhdanova Yu.Yu.
- Geotectonic model of the deep structure of the Zmeinogorsky ore district of Rudny Altai according to geological interpretation of geophysical survey complex**
Egorov A.S., Kalinin D.F., Sekerina D.D.

- | | |
|---|---|
| <p>Наледи в бассейне р. Уды (Западное Забайкалье): особенности современного распространения и возможности использования
 Черных В.Н., Цыдыпов Б.З., Содномов Б.В., Аюржанаев А.А., Жарникова М.А., Гуржапов Б.О., Гармаев Е.Ж.</p> <p>Региональный, локальный и текущий прогноз удароопасности участков угольного пласта на основе сейсмического мониторинга
 Разумов Е.Е., Простов С.М., Шабанов Е.А.</p> <p>Аспекты термической утилизации органических отходов птицеводства
 Козырь Д.А.</p> <p>Комплексное исследование распределения теллуру-висмутовой минерализации в рудах колчеданных месторождений Абыз и Малеевское (Республика Казахстан)
 Николаева А.Н., Мазуров А.К.</p> <p>Методика определения оптимального объема реагента для кислотных обработок карбонатных коллекторов на основе метода кривой восстановления давления
 Юрин А.В., Рябokon Е.П.</p> <p>Сорбенты на основе вспененного фосфатного стекла для сбора нефтепродуктов с загрязнённых почв и водных поверхностей
 Карапетян К.Г., Дорош И.В., Згонник П.В., Коршунов А.Д., Перина А.И.</p> <p>Роль сейсмогеологического моделирования в атрибутом анализе данных сейсморазведки на примере прогноза толщин пласта Ю3т месторождения нефти юго-западного Казахстана
 Белозёров В.Б., Волкова А.А.</p> | <p>161 Icings in the Uda river basin (Western Transbaikalia): peculiarities of modern distribution and possibilities of use
 Chernykh V.N., Tsydypov B.Z., Sodnomov B.V., Ayurzhanaev A.A., Zharnikova M.A., Gurzhapov B.O., Garmaev E.Z.</p> <p>174 Regional, local and current forecast of the impact hazard of coal seam sites based on seismic monitoring
 Razumov E.E., Prostov S.M., Shabanov E.A.</p> <p>187 Aspects of thermal utilization of organic poultry waste
 Kozyr D.A.</p> <p>197 Comprehensive research of the distribution of tellurium-bismuth mineralization in the ores of the Abyz and Maleevskoe sulfide deposits (Republic of Kazakhstan)
 Nikolaeva A.N., Mazurov A.K.</p> <p>215 Method for determining reagent optimum volume for acid treatments of carbonate reservoirs based on a pressure build-up curve method
 Yurin A.V., Riabokon E.P.</p> <p>227 Sorbents based on foamed phosphate glass for collecting petroleum oil products from contaminated soils and water surfaces
 Karapetyan K.G., Dorosh I.V., Zgonnik P.V., Korshunov A.D., Perina A.I.</p> <p>241 Role of seismogeological modeling in the attribute analysis of seismic data using the example of the forecast of the thickness of the Yu3t formation of the southwestern Kazakhatsan oil field
 Belozarov V.B., Volkova A.A.</p> |
|---|---|

УДК 622.245.422

DOI: 10.18799/24131830/2024/8/4244

Шифр специальности ВАК: 2.8.2

Разработка тампонажных растворов с добавками частиц наноглины для строительства нефтяных скважин в условиях повышенных температур

М.В. Нуцкова, М. Алхаззаа✉

Санкт-Петербургский горный университет, Россия, г. Санкт-Петербург

✉s215139@stud.spmi.ru

Аннотация. Актуальность. Снижение прочности – явление, которое становится более выраженным при температуре выше 110 °С, характеризуется значительными химическими и микроструктурными изменениями портландцемента в условиях высоких температур. Добавление частиц кремнезема (SiO₂) в цемент может значительно увеличить его устойчивость к снижению прочности, когда температура превышает 110 °С. Частицы наноглины в настоящее время используются в цементной промышленности для повышения прочности цементной матрицы благодаря своей способности заполнять капиллярные микропоры и сравнительно небольшому размеру. **Цель:** исследование влияния добавления наночастиц (наноглины) в цемент Саудовского класса G на прочность на сжатие и растяжение, а также проницаемость цементного камня в условиях высоких (300 °С) температур. **Объекты:** шесть образцов цементных растворов с различными концентрациями наноглины, цементные камни, испытанные через 7 и 28 суток твердения при температуре 25 и 300 °С. **Методы.** Оценка химического состава цемента проводилась рентгенофлуоресцентным методом на анализаторе WORKSTN-V Olympus Vanta. Оценка физического состава цемента осуществлялась методом дифракции лучей на лазерном анализаторе размеров частиц Mastersizer 2000. Испытание образцов тампонажного камня выполнялось в соответствии с ISO 10426-2:2003 на гидравлическом прессе 65-L1132. Испытание прочности образцов на растяжение по бразильскому методу проводилось в соответствии со стандартом ASTM D 3967-08 на гидравлическом прессе 65-L1132. Проницаемость образцов определялась при однофазной стационарной фильтрации на установке для исследования фильтрационно-емкостных свойств керна ПИК-ОФП-УЧ в соответствии с ISO 10426-2:2003. **Результаты.** Полученные данные показали, что разрушения цемента при экстремально высоких температурах можно избежать за счет использования наноглины (до 3 % от массы цемента). Микроструктура цементной матрицы существенно пострадала из-за агрегации наночастиц при добавлении более 3 % наноглины. Все реологические характеристики цементного раствора были улучшены за счет добавления частиц наноглины.

Ключевые слова: тампонажный цемент, Саудовский цемент класса G, прочность цемента на сжатие, частицы наноглины, высокотемпературные условия

Для цитирования: Нуцкова М.В., Алхаззаа М. Разработка тампонажных растворов с добавками частиц наноглины для строительства нефтяных скважин в условиях повышенных температур // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 8. – С. 7–17. DOI: 10.18799/24131830/2024/8/4244

UDC 622.245.422

DOI: 10.18799/24131830/2024/8/4244

Development of cement slurries with additives of nanoclay particles for the construction of oil wells at elevated temperatures

M.V. Nutskova, M. Alhazzaa✉

Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation

✉s215139@stud.spmi.ru

Abstract. Relevance. Strength decrease is a phenomenon that becomes more pronounced as the temperature rises above 110°C. It is characterized by significant chemical and microstructural changes that Portland cement undergoes at high temperatures. Adding silica particles (SiO_2) to cement can significantly increase cement resistance to strength reduction when the temperature exceeds 110°C. Nanoclays are currently used in the cement industry to increase the strength of the cement matrix due to their ability to fill capillary micropores and due to their relatively small particle size. **Aim.** To investigate the effect of adding nanoparticles (nanoclay) to Saudi grade G cement on compressive and tensile strength, and cement stone permeability under high temperature conditions (300°C). **Objects.** Six samples of cement mortars with different concentrations of nanoclay, cement stones, tested after 7 and 28 days of hardening at 25 and 300°C. **Methods.** Cement chemical composition was evaluated by the X-ray fluorescence method with the WORKSTN-V Olympus Vanta X-ray fluorescence analyzer. Cement physical composition was evaluated by the method of ray diffraction on the Mastersizer 2000 laser particle size analyzer. The test of the grouting stone samples was carried out in accordance with ISO 10426-2:2003 on a hydraulic press 65-L1132. The tensile strength of the samples by the Brazilian method was tested in accordance with ASTM D 3967-08 standard on a hydraulic press 65-L1132. The permeability of the samples was determined by single-phase stationary filtration at a facility for studying the filtration and capacitance properties of the PIK-OFU-UCH core in accordance with ISO 10426-2:2003. **Results.** The data obtained showed that cement destruction at extremely high temperatures can be avoided by using nanoclay (up to 3% by weight of cement). The microstructure of the cement matrix was significantly affected due to the aggregation of nanoparticles when more than 3% of nanoclay was added. All rheological characteristics of the cement slurry were improved by the addition of nanoclay particles.

Keywords: well cement, Saudi cement of class G, cement compressive strength, nanoclay particles, high temperature conditions

For citation: Nutskova M.V., Alhazzaa M. Development of cement slurries with additives of nanoclay particles for the construction of oil wells at elevated temperatures. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 8, pp. 7–17. DOI: 10.18799/24131830/2024/8/4244

Введение

При строительстве нефтяных и газовых скважин одним из важнейших факторов, оказывающих влияние на осуществление любых операций, является пластовая температура, которая непосредственно воздействует как на фазовое состояние и физико-химические свойства пластовых флюидов, так и на выбор технологии работ, включая подбор рецептур буровых и тампонажных растворов [1–4]. С ростом глубин бурения скважин растут и пластовые температуры. Таким образом, сложности, обусловленные наличием высокого температурного фактора, могут встречаться вне зависимости от региона. Хотя большинство месторождений с высокими пластовыми температурами (порядка 130–150 °С) находятся в Северо-Кавказской и Прикаспийской нефтегазоносных провинциях, есть также много месторождений с пластовыми температурами выше 100 °С в других нефтегазоносных провинциях России (например, такие месторождения, как Хальмер-Паютинское, Русско-Реченское, Ключевское, Петровальское, Камышинское, Антиповско-Балыклейское, Лободинское, Западно-Ровенское, Астраханское, Фонтановское, Левкинское, Восточно-Северское, Новодмитриевское, Калужское, Алексеевское, Сердюковское, Майкопское, Усть-Лабинское, Некрасовское, Южно-Советское, Митрофановское, Ловлинское, Кавказское, Расшеватское, Мирненское, Сельское, Веселовское, Ачикулакское, Лесное, Мектебское, Западно-Мектебское, Кум-Тюбинское, Подсолнечное, Владимировское, Союзное, Нефтекумское, Северо-Мирненское, Крутойское, Южно-Серафимовское и другие) [5, 6].

При разработке программы цементирования необходимо учитывать влияние температуры на жидкий тампонажный раствор (который является коагуляционной структурой) на этапе закачки и уже схватившийся (гидратированный цемент, имеющий кристаллизационную структуру) для сохранения цементным камнем требуемых физико-химических свойств [7–15]. Прогнозируется, что высокие температуры отрицательно воздействуют на механические характеристики гидратированного портландцемента, оказывая влияние на продукты гидратации клинкерных материалов [7, 16–23].

Снижение прочности, которое становится более выраженным при температурах выше 110 °С, характеризуется значительными химическими и микроструктурными изменениями, которым подвергается портландцемент в условиях высоких температур [9, 24–29]. В матрице цементного камня со временем образуются богатые кальцием продукты, что ухудшает прочностные и механические свойства, а также увеличивает ее проницаемость. Ранние исследования установили, что добавление частиц кремнезема (SiO_2) в цемент, обычно превышающее 30 % от массы цемента, может значительно увеличить устойчивость цемента к снижению прочности, когда температура превышает 110 °С [14]. Образование другой стабильной фазы гидросиликата кальция (C-S-H), такой как тоберморит, труксит и ксонотлит, которые могут улучшить механические свойства цементной матрицы, обычно является результатом взаимодействия реакционноспособных частиц SiO_2 с портландитом (Ca(OH)_2 или CH), одним из основных продуктов

процесса гидратации цемента [25, 27–35]. Материалы с высоким содержанием кремнезема, такие как кварцевый песок и кварцевая мука, являются добавками, повышающими устойчивость и долговечность образующегося тампонажного камня [36].

Исследовано применение частиц кремнезема для повышения стойкости тампонажного цемента к высокотемпературным условиям [7]. М.А. Санюан и др. пришли к выводу, что 35 % от массы цемента является оптимальной добавкой частиц кремнезема для значительного повышения стойкости цемента к высокотемпературным условиям, вплоть до 300 °С. Из-за способности заполнять капиллярные микропоры благодаря своему небольшому размеру частицы наноглины сегодня применяются в цементной промышленности для усиления прочности цементной матрицы. Эта способность позволяет повысить плотность упаковки сформированного цемента. Уменьшение размера частиц пуццолановых материалов (таких как наноглины и микрокремнезем) значительно повышает прочность цемента [36, 37]. Исследователи изучили, как добавление 0,1–0,5 % частиц наноглины к обычному портландцементу повлияет на прочность цементного камня при изменении температуры от 25 до 1000 °С [15]. Было обнаружено, что частицы наноглины могут повышать прочность цементного камня на сжатие при повышении температуры до 300 °С [14]; при температуре от 440 до 580 °С отмечено некоторое снижение прочности на сжатие, а при достижении температуры 1000 °С снижение прочности на сжатие составило 10 %.

Целью данного исследования является оценка влияния добавления наночастиц (наноглины) в Саудовский цемент класса G на прочность на сжатие и растяжение, а также проницаемость цементного камня в условиях высоких температур 300 °С.

Материалы и методы

Материалы

Материалы, использованные в этом исследовании, включают: Саудовский цемент класса G, соответствующий спецификации 10A АНИ (Американский нефтяной институт) (производство Jiahua Enterprises Corp., Сычуань, Китай); частицы наноглины различных концентраций и деионизированную воду.

Химический и физический состав цементов класса G с плотностью 3,15 г/см³ представлены на рис. 1. Оценка химического состава проводилась рентгенофлуоресцентным методом при использовании рентгенофлуоресцентного анализатора WORKSTN-V Olympus V, физического состава – методом дифракции лучей на лазерном анализаторе размеров частиц Mastersizer 2000.

Базовый состав тампонажного раствора: цемент – 500 г, пластификатор (С-3) – 0,8 % от массы цемента, вода – 44 % от массы цемента. Модифи-

цированные образцы: 5 опытных образцов с тем же базовым составом, с добавлением кварцевой муки из расчета 35 % от массы цемента на каждый из образцов и частиц наноглины из расчета (0–4) % от массы цемента соответственно.

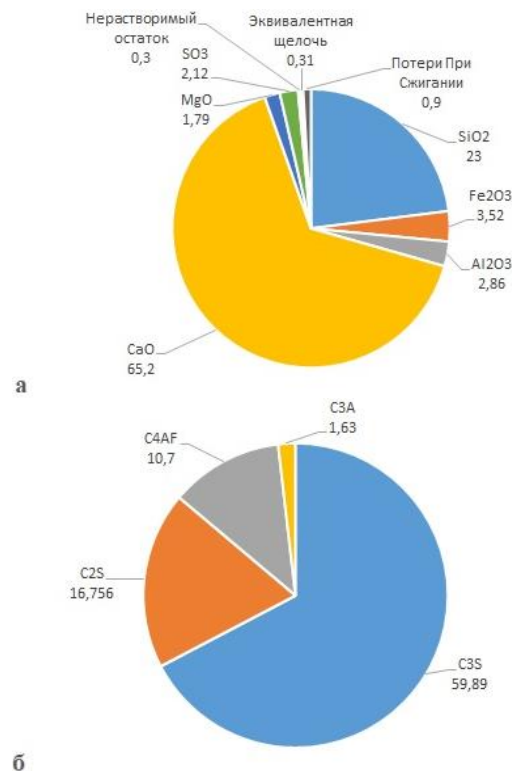


Рис. 1. Состав используемого тампонажного цемента класса G: а) химический; б) физический

Fig. 1. Composition of the grouting cement used, class G: а) chemical; б) physical

На рис. 2 показаны результаты гранулометрического анализа использованного в данном исследовании Саудовского цемента класса G (рис. 2, а) с распределением размера частиц и его сравнение с цементом, использованным в исследовании А.А. Махмоуд и др. [10]. Более 50 % частиц исследуемого цемента имеют размер менее 21,27 мкм, а около 90 % частиц цемента имеют размер менее 47,18 мкм. Используемые тампонажные материалы имеют химически, физически и гранулометрически близкие составы, а следовательно, полученные результаты могут быть сравнимы и соизмеримы.

Кварцевая мука представляет собой материал, состоящий более чем на 99 % из SiO₂ [15, 38, 39], и имеет плотность 2,64 г/см³. Пластификатор (С-3) представляет собой специальный понизитель трения – смесь различной молекулярной массы натриевых солей полиметиленафталинесульфокислот. Частицы наноглины, использованные в этом исследовании, представляют собой частицы монтморил-

лонита, модифицированные реакцией катионного обмена для перевода их в более гидрофобное состояние, подобно методике, описанной М.К. Рахман и др. [39, 40], плотность частиц наноглины – 1,98 г/см³.

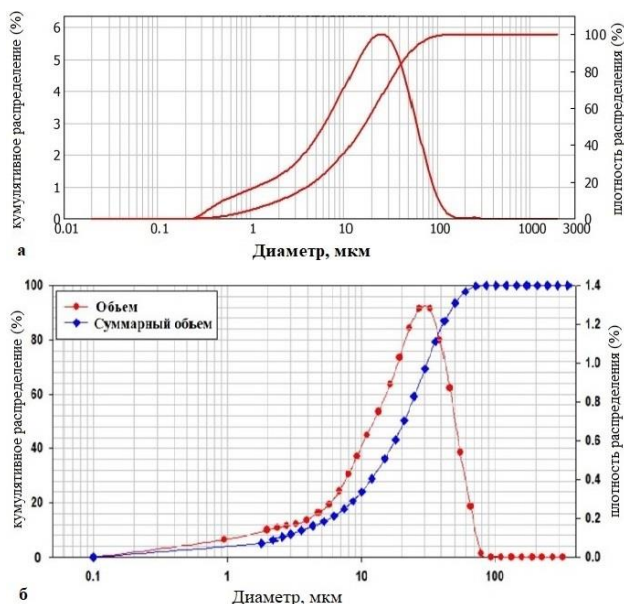


Рис. 2. Гранулометрический анализ цемента по размерам: а) собственные исследования; б) мировые исследования [10]

Fig. 2. Granulometric analysis of cement by size: a) own research; б) world research [10]

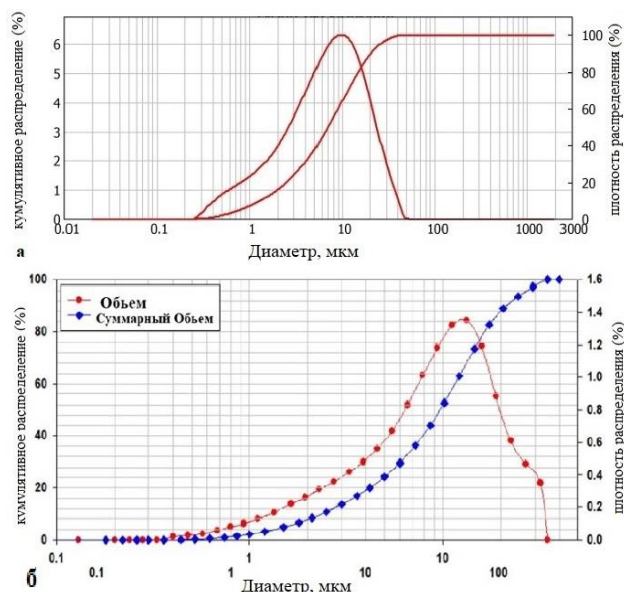


Рис. 3. Гранулометрический анализ наноглины по размерам: а) собственные исследования; б) мировые исследования [10]

Fig. 3. Granulometric analysis of nanoclay by size: a) own research; б) world research [10]

На рис. 3 показаны результаты гранулометрического анализа модифицированных частиц монтмориллонита наноглины, использованных в этом исследовании, и их сравнение с частицами, использованными в исследовании [10]: около 90 % частиц наноглины имеют размер менее 20 мкм, в т. ч. более 50 % частиц – менее 10 мкм.

Методы

Подготовка образцов и отверждение

Цементные растворы с плотностью около 1,97 г/см³ были приготовлены и испытаны в соответствии с ISO 10426-2:2003 (API RP 10B-2) [40, 41]. Изготовлено 6 образцов тампонажного раствора, состав которых был зашифрован следующим образом: КхГу, где К – кварцевая мука, х – содержание (%) кварцевой муки, Г – наноглина, у – содержание (%) частиц наноглины. Таким образом, К0Г0 – базовый состав, К35Г0 – тампонажный раствор, содержащий 35 % кварцевой муки, без добавления наноглины, К35Г1, К35Г2, К35Г3 и К35Г4 – тампонажные растворы, содержащие 35 % кварцевой муки + 1, 2, 3 и 4 мас. % наноглины соответственно. После приготовления тампонажные растворы помещали в кубические формы с размерами ребер 40 мм для испытаний на прочность при сжатии, в цилиндрические формы диаметром 38,1 мм и длиной 22,9 мм для испытаний на прочность при растяжении (по бразильскому методу) на гидравлическом прессе 65-L1132 и проницаемость при однофазной стационарной фильтрации на установке для исследования фильтрационно-емкостных свойств ядра ПИК-ОФП-УЧ. Затем формы погружали в водяную баню с температурой 25 °С на заданное время. Для анализа каждого из составов использовались два температурных режима: низкотемпературный (25 °С) и высокотемпературный (циклически меняющийся от 25 до 300 °С) (рис. 1). Перед испытаниями тампонажного камня (на прочность на сжатие и растяжение, проницаемость и др.), исследуемого в низкотемпературном режиме, образцы погружали в водяную баню на 7 и 28 сут. Образцы, исследуемые в высокотемпературном режиме, помещались в водяную баню при температуре 25 °С на 4 и 25 сут., затем в течение 3 сут. в автоклаве подвергались воздействию температуры 300 °С для имитации цикла работы паронагнетательных скважин. Затем эти образцы охлаждались и испытывались так же, как и для низкотемпературных условий. В таблице показаны условия выдержки образцов тампонажного камня до испытаний.

Таблица. Условия выдержки образцов тампонажного камня

Table. Conditions for curing cement stone samples

Режим Mode	Время хранения образцов Sample storage time	Температура среды, °С Ambient temperature, °C
Низкотемпературный Low temperature	7 суток в водяной бане 7 days in a water bath	25
	28 суток в водяной бане 28 days in a water bath	25
Высокотемпературный (один термоцикл) High temperature (one thermal cycle)	7 суток: 4 суток в водяной бане 3 суток в автоклаве 7 days: 4 days in a water bath 3 days in autoclave	25 300
	28 суток: 25 суток в водяной бане 3 суток в автоклаве 28 days: 25 days in a water bath 3 days in autoclave	25 300

Измерение прочности на сжатие

Прочность образцов на сжатие оценивалась в соответствии с ISO 10426-2:2003 (API RP 10B-2) [40, 41]. Для измерения прочности цементной матрицы на сжатие через 7 и 28 сут. для каждого температурного режима, приведенного в таблице, и для всех исследуемых составов (рис. 1, б) использовали по три образца кубической формы с ребром 40 мм. На основании средней прочности трех испытанных образцов рассчитывали прочность на сжатие каждой отдельной композиции при каждом конкретном температурном режиме.

Измерение проницаемости

На цилиндрических образцах диаметром 38,1 мм и длиной 22,9 мм измеряли газопроницаемость различных составов цементного камня. Проницаемость образцов рассчитывалась с использованием закона Хагена–Пуазейля, который является широко используемым законом для расчета проницаемости в соответствии с ISO 10426-2:2003 (API RP 10B-2) [40, 41].

Измерение прочности на растяжение

Для испытания на растяжение использовались цилиндрические образцы диаметром 38,1 мм и длиной 22,9 мм. Максимальную нагрузку, которую образец мог выдержать до того, как он подвергнется деформации, определяли с помощью бразильского теста [42], процедуры косвенного испытания прочности на растяжение (рис. 4).

Прочность образца на растяжение σ_t (МПа) определялась с использованием уравнения (1):

$$\sigma_t = \frac{2P}{\pi dl}, \quad (1)$$

где P – разрушающая нагрузка (Н); d и l – диаметр и длина образца цементного камня (мм) соответ-

ственно. По три цилиндрических образца каждого из составов были использованы для оценки прочности цементного камня на растяжение для каждого из температурных режимов. Предел прочности каждого из составов рассчитывался как среднее значение предела прочности при растяжении трех испытанных образцов.

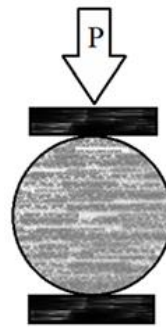


Рис. 4. Схема для проведения испытания прочности тампонажного камня с помощью бразильского теста

Fig. 4. Scheme for testing cement stone strength using the Brazilian test

Результаты и обсуждение

Влияние наноглины на прочность на сжатие

Поскольку предполагается, что снижение прочности цемента происходит при температурах выше 110 °С, изучается влияние добавления наноглины на сохранение прочности изучаемых образцов тампонажного камня в различных температурных условиях [27, 43]. На рис. 5, 6 показаны результаты определения прочности для всех образцов тампонажного камня, подвергнутых воздействию различных температурных режимов (25 и 300 °С), а также для сравнения нанесены данные исследований А.А. Махмоуд [10], проведенных при температуре 38 °С.

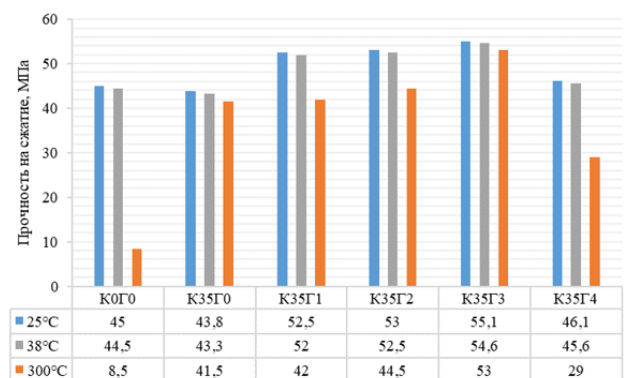


Рис. 5. Прочность на сжатие образцов, выдержанных при 25 и 300 °С (собственные исследования) и 38 °С [10] через 7 суток

Fig. 5. Compressive strength of the samples cured at 25 and 300 °C (own research) and 38 °C [10] after 7 days

Прочность на сжатие образцов цементного камня базового состава (К0Г0), выдержанного в высокотемпературном (300 °С) режиме на 81,1 и 78,6 % ниже прочности образцов, выдержанных в низкотемпературном (25 °С) режиме, после 7 (рис. 5) и 28 сут. (рис. 6) обработки соответственно. Аналогична ситуация при сравнении с исследованиями, проведенными при температуре 38 °С: прочность образцов, подвергавшихся нагреву до 300 °С ниже на 80,9 и 78,4 %.

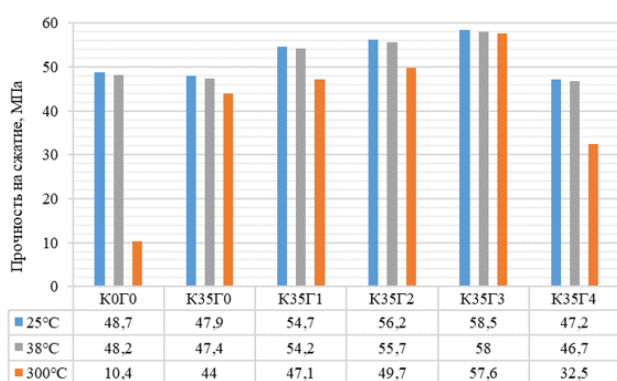


Рис. 6. Прочность на сжатие образцов, выдержанных при 25 и 300 °С (собственные исследования) и 38 °С [10] через 28 суток

Fig. 6. Compressive strength of the samples cured at 25 and 300°C (own research) and 38°C [10] after 28 days

Добавление к цементному раствору кварцевой муки в количестве 35 мас. % (образец К35Г0) привело к значительному увеличению прочности цемента, выдержанного в высокотемпературном режиме: прочность образца К35Г0 составила 41,5 МПа через 7 сут. и 44 МПа через 28 сут., что выше прочности образца К0Г0 на 79,5 и 76,4 % соответственно. Улучшение прочности связано с образованием более стабильных продуктов С-С-Н в процессе гидратации благодаря взаимодействию частиц SiO₂ с СН [37].

Также замечено, что добавление до 3 мас. % частиц наноглины к раствору, содержащему 35 мас. % кварцевой муки (образец К35Г0), привело к повышению прочности цемента при всех исследованных температурных режимах: при 25 °С добавление 3 % частиц наноглины повысило прочность цемента на 25,8 % через 7 сут. (прочность составила 53,0 МПа) и на 22,1 % через 28 сут. (прочность составила 57,6 МПа) по сравнению с образцом К35Г0. Это увеличение прочности объясняется быстрой реакцией частиц наноглины со свободным известняком в процессе гидратации, что приводит к образованию более плотного микроструктурного геля вторичного С-С-Н и уплотнению матрицы цемента [44–46].

Отмечено снижение прочности цементного камня при добавлении 4 мас. % наноглины (образец К35Г4) по сравнению с добавкой 3 % (образец К35Г3): в низкотемпературных режимах прочность понизилась с 16,3 до 19,5 %, в высокотемпературном – с 43,6 до 45,3 %. Такой результат объясняется тем, что использование наночастиц в высоких концентрациях (т. е. более 3 %) будет вызывать их агломерацию, эти скопления приведут к образованию слабых зон, что препятствует образованию гомогенного гидрата. В результате прочность цемента будет снижаться как при низких температурах, так и при высоких [47, 48].

Влияние содержания наноглины на предел прочности при растяжении

Результаты определения прочности образцов цементного камня на растяжение представлены на рис. 7, 8.

Аналогично результатам исследования прочности образцов на сжатие, прочность на растяжение образцов цементного камня базового состава (К0Г0), выдержанного в высокотемпературном (300 °С) режиме на 60,7 и 63,6 % ниже прочности образцов, выдержанных в низкотемпературном (25 °С) режиме, после 7 и 28 сут. обработки соответственно, как и при сравнении с исследованиями, проведенными при температуре 38 °С: прочность образцов, подвергавшихся нагреву до 300 °С ниже на 57,0 и 60,3 %.

За счет создания стабильных форм С-С-Н в ходе реакции гидратации между реакционноспособным SiO₂ и СН [26] добавление 35 % кварцевой муки (образец К35Г0) значительно повысило сопротивление цемента разрушению при растяжении и высоких температурах – в 2,3–2,5 раза.

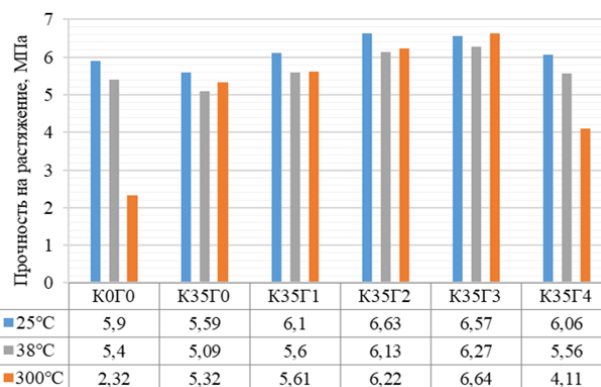


Рис. 7. Прочность на растяжение образцов, выдержанных при 25 и 300 °С (собственные исследования) и 38 °С [10] через 7 суток

Fig. 7. Tensile strength of the samples cured at 25 and 300°C (own research) and at 38 °С [10] after 7 days

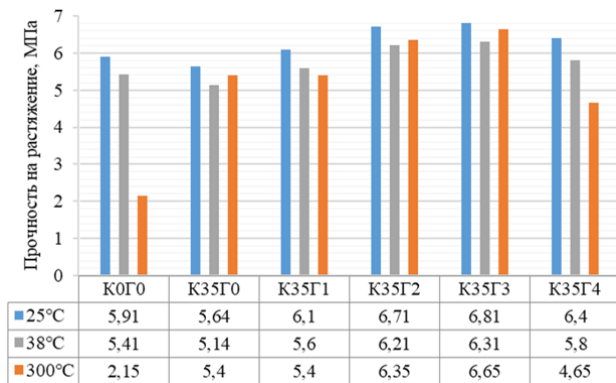


Рис. 8. Прочность на растяжение образцов, выдержанных при 25 и 300 °С (собственные исследования) и 38 °С [10] через 28 суток

Fig. 8. Tensile strength of the samples cured at 25 and 300°C (own research) and at 38°C [10] after 28 days

Отмечена зависимость роста прочности образца цементного камня на растяжение с увеличением доли наноглины в составе (до 3 мас. %) – с 17,5 до 24,8 % по сравнению с составами с кварцевой мукой, но без добавок наноглины. Так, например, прочность на растяжение образца K35Г3, выдержанного в высокотемпературном режиме, содержащего 35 % кварцевой муки и 3 % наноглины, составляет 6,64 МПа (рис. 7) через 7 суток и 6,65 МПа (рис. 8) через 28 суток, соответственно, что на 24,8 и 23,1 % выше, чем у образца K35Г0, который содержит только кварцевую муку. С увеличением доли наноглины до 4 % происходит снижение прочностных характеристик с 6,0 до 38,1 %, что также отмечалось и при обработке результатов измерения прочности на сжатие.

Влияние содержания наноглины на измерение проницаемости

Результаты испытаний на проницаемость образцов цементного камня, выдержанных в высокотемпературных условиях, представлены на рис. 9. Все образцы цемента были высушены перед измерением газопроницаемости, согласно методике М.А. Санюан и Р. Муноз-Мартиалай [47, 49].

Согласно рис. 9, базовый образец (K0Г0) имеет проницаемость 0,0054 и 0,0056 мД через 7 и 28 суток соответственно. Анализ полученных данных показывает, что ввод кварцевой муки приводит к снижению проницаемости на 48,1 % через 7 суток и на 55,4 % через 28 суток (образец K35Г0). Ввод наноглины (до 2 %) позволяет добиться снижения проницаемости дополнительно до 16,0 %, а по сравнению с базовым составом – до 62,5 %. При увеличении добавки наноглины до 3 % отмечено увеличение проницаемости образцов цементного камня с 4,3 % (через 7 суток твердения) до 15,0 % (через 28 суток). Дальнейшее увеличение доли

наноглины (до 4 %) привело к значительному росту проницаемости: в 1,8–2,2 раза выше, чем у образца K35Г0, и в 2,2–2,7 раза выше по сравнению с лучшим результатом (при добавке 2 % наноглины).

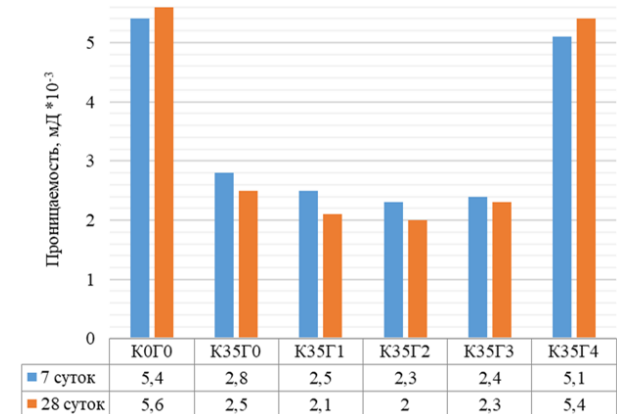


Рис. 9. Проницаемость образцов цементного камня после хранения в высокотемпературных условиях (один термоцикл)

Fig. 9. Permeability of cement stone samples after storage in high temperature conditions (one thermal cycle)

Заключение

Целью данного исследования было получение зависимости прочности и проницаемости цементного камня, выдержанного в различных температурных условиях, от увеличения доли ввода наноглины в состав тампонажного раствора. Полученные результаты свидетельствуют о том, что ввод кварцевой муки (по сравнению с базовым составом) положительно сказывается на термостойкости (при 300 °С прочность в 4,2–4,9 раза выше) и проницаемости (на 48,1–55,4 % ниже) получаемого цементного камня, ввод наноглины (в состав с кварцевой мукой) до 2 % приводит к повышению (по сравнению с составом K35Г0) прочности на сжатие на 6,7–17,4 % и на 14,5–17,2 % на растяжение, а также достижению минимальной проницаемости – в 2,3–2,8 раза ниже по сравнению с базовым составом (K0Г0). Увеличение доли наноглины до 3 % приводит к дальнейшему росту прочности (на 14,9–23,6 % по сравнению с составом K35Г0), а также к росту проницаемости (на 4,3–15,0 % по сравнению с составом K35Г2). Возникновение отрицательного эффекта от увеличения доли наноглины связывается с агломерацией частиц, что приводит к неравномерной микроструктуре и возможному образованию микротрещин в цементном камне. Таким образом, для практического применения можно рекомендовать ввод до 35 % кварцевой муки и до 2 % наноглины для обеспечения высоких показателей прочности (до 49,7 МПа при 300 °С) и низких значений проницаемости (0,002 мД).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Heavy-oil reservoirs / C. Curtis, R. Kopper, E. Decoster, A. Guzman-Garcia, C. Huggins, L. Knauer, M. Minner, N. Kupsch, L. Linares, H. Rough, M. Waite // *Oilfield review*. – 2002. – Vol. 14. – № 3. – P. 30–51.
2. Kadochnikov V.G., Dvoynikov M.V. Development of technology for hydromechanical breakdown of mud plugs and improvement of well cleaning by controlled buckling of the drill string // *Applied Sciences*. – 2022. – Vol. 12. – № 13. – P. 6460.
3. Kunshin A., Dvoynikov M., Timashev E., Starikov V. Development of monitoring and forecasting technology energy efficiency of well drilling using mechanical specific energy // *Energies*. – 2022. – Vol. 15. – № 19. – P. 7408.
4. Lavrik A., Buslaev G., Dvoynikov M. Thermal stabilization of permafrost using thermal coils inside foundation piles // *Civil Engineering Journal*. – 2023. – Vol. 9. – № 4. – P. 927–938.
5. Температурный режим нефтегазоносных отложений северной части Западно-Сибирской плиты / С.В. Воробьев, П.А. Горбунов, О.В. Максименко, Д.Я. Хабибуллин // *Геология нефти и газа*. – 2018. – № 5. – С. 29–35.
6. Захаров Е.В., Кулибакина И.Б. Геотермический режим недр - один из основных факторов, определяющих степень перспективности нефтегазоносных бассейнов // *Геология нефти и газа*. – 1997. – Т. 12. – С. 31–36.
7. Silica content influence on cement compressive strength in wells subjected to steam injection / B.L.S. Costa, G.G. Souza, J.C.O. Freitas, R.G.S. Araujo, P.H.S. Santos // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2017. – Vol. 158. – P. 626–633.
8. Двойников М.В., Кучин В.Н., Минцаев М.Ш. Разработка вязкоупругих систем и технологии изоляции водоносных горизонтов с аномальными пластовыми давлениями при бурении нефтегазовых скважин // *Записки Горного института*. – 2021. – Т. 247. – С. 57–65.
9. Luke K. Phase studies of pozzolanic stabilized calcium silicate hydrates at 180 °C // *Cement and concrete research*. – 2004. – Vol. 34. – № 9. – P. 1725–1732.
10. Influence of nanoclay content on cement matrix for oil wells subjected to cyclic steam injection / A.A. Mahmoud, S. Elkatatny, A. Ahmed, R. Gajbhiye // *Materials*. – 2009. – Vol. 12. – № 9. – P. 1452.
11. Mitchell R.F., Miska S.Z. Fundamentals of drilling engineering. – Texas, Richardson Publ., 2011. – Ch. 4. – 139 p.
12. Moradi S.T., Nikolaev N.I. Considerations of well cementing materials in high-pressure, high-temperature conditions // *International Journal of Engineering*. – 2016. – Vol. 29. – № 9. – P. 1214–1218.
13. Vu M.H., Sulem J., Laudet J.B. Effect of the curing temperature on the creep of a hardened cement paste // *Cement and concrete research*. – 2012. – Vol. 42. – № 9. – P. 1233–1241.
14. Wang W.C. Compressive strength and thermal conductivity of concrete with nanoclay under various high temperatures // *Construction and Building Materials*. – 2017. – Vol. 147. – P. 305–311.
15. Zimina D.A., Zhapkhandaev C.A., Petrov A.A. Analysis of the effect of nanosilicates on the strength and porosity of cement stone // *Key Engineering Materials*. – 2020. – Vol. 854. – P. 175–181.
16. Effect of the hydration temperature on the pore structure of cement paste: experimental investigation and micromechanical modelling / S. Bahafid, S. Ghabezloo, P. Faure, M. Duc, J. Sulem // *Cement and Concrete Research*. – 2018. – Vol. 111. – P. 1–14.
17. A new model for optimal mechanical and thermal performance of cement-based partition wall / S. Huang, M. Hu, Y. Huang, N. Cui, W. Wang // *Materials*. – 2018. – Vol. 11. – № 4. – P. 615.
18. Microstructural investigation of heat-treated ultra-high-performance concrete for optimum production / S.H. Kang, J.H. Lee, S.G. Hong, J. Moon // *Materials*. – 2017. – Vol. 10. – № 9. – P. 1106.
19. Effect of elevated temperatures on compressive strength and microstructure of cement paste containing palm oil clinker powder / M.R. Karim, F.I. Chowdhury, H. Zayed, M.R. Saidurd // *Construction and Building Materials*. – 2018. – Vol. 183. – P. 376–383.
20. Investigation of structural degradation of fiber cement boards due to thermal impact / Z. Ranachowski, P. Ranachowski, T. Dębowski, T. Gorzelańczyk, K. Schabowicz // *Materials*. – 2019. – Vol. 12. – № 6. – P. 944.
21. Dilatometric behavior and crystallographic characterization of Portland-polyurethane composites for oil well high-temperature cementing applications / I.B. Silva, A.E. Martinelli, W.R.M. Souza, J.C.O. Freitas, M.A.F. Rodrigues // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2018. – Vol. 169. – P. 553–559.
22. Szeląg M. The influence of metakaolin on the development of thermal cracks in a cement matrix // *Materials*. – 2018. – Vol. 11. – № 4. – P. 520.
23. Evaluation of properties and microstructure of cement paste blended with metakaolin subjected to high temperatures / W. Wang, X. Liu, L. Guo, P. Duan // *Materials*. – 2019. – Vol. 12. – № 6. – P. 941.
24. Kovalchuk V.S., Nikolaev N.I. Carbon additives for high-quality well cementing // *IOP Conference Series (Earth and Environmental Science): IV International Scientific Conference (Agribusiness, Environmental Engineering and Biotechnologies)*. – Krasnoyarsk, IOP Publ., 2021. – Vol. 677. – № 5. – P. 052035.
25. Development of hydraulic turbodrills for deep well drilling / M.V. Dvoynikov, D.I. Sidorkin, A.A. Kunshin, D.A. Kovalev // *Applied Sciences*. – 2021. – Vol. 11. – № 16. – P. 7517.
26. Ichim A., Teodoriu H.C. Investigations on the surface well cement integrity induced by thermal cycles considering an improved overall transfer coefficient // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2017. – Vol. 154. – P. 479–487.
27. Nelson E.B., Guillot D. Well cementing. – Texas: Schlumberger, Sugar Land, 2006. – 799 p.
28. Redrovan P., Kuchin V., Dvoynikov M. Development of technology for increasing well completion during drilling in the abnormal reservoir pressures intervals. SHS Web of Conferences. First International Scientific Seminar (Circumpolar Studies). EDP Sciences. – 2020. – Vol. 84. – P. 5.
29. Zimina D.A., Nutskova M.V. Research of technological properties of cement slurries based on cements with expanding additives, Portland and magnesia cement // *IOP Conference Series (Materials Science and Engineering)*. – St Petersburg, 2019. – Vol. 666. – № 1. – P. 012066.
30. Eilers L.H., Root R.L. Long-term effects of high temperature on strength retrogression of cements // *Proc. of the Annual California Regional Meeting of the Society of Petroleum Engineers of AIME*. – Long Beach, California, 1976. – P. SPE-5871-MS.

31. Iverson B., Maxson J., Bour D. Strength retrogression in cements under high temperature conditions // Proc. of the thirty-fifth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering. – Stanford, California, 2010. – P. SGP-TR-188.
32. Leusheva E., Alikhanov N., Morenov V. Barite-free muds for drilling-in the formations with abnormally high pressure // Fluids. – 2022. – Vol. 7. – № 8. – P. 268.
33. Мардашов Д.В. Разработка блокирующих составов с кольматантом для глушения нефтяных скважин в условиях аномально низкого пластового давления и карбонатных пород-коллекторов // Записки Горного института. – 2021. – Т. 251. – С. 667–677.
34. Николаев Н.И., Леушева Е.Л. Тампонажные составы пониженной плотности для цементирования скважин в условиях аномально низких пластовых давлений // Записки Горного института. – 2019. – Т. 236. – С. 194–200.
35. Richardson I.G. The calcium silicate hydrates // Cement and concrete research. – 2008. – Vol. 38. – № 2. – P. 137–158.
36. Леушева Е.Л., Алиханов Н.Т., Бровкина Н.Н. Исследование реологических свойств безбаритного бурового раствора повышенной плотности // Записки Горного института. – 2022. – Т. 258. – С. 976–985.
37. Effect of silica fume fineness on the improvement of Portland cement strength performance / M.A. Sanjuán, C. Argiz, J.C. Gálvez, A. Moragues // Construction and Building Materials. – 2015. – Vol. 96. – P. 55–64.
38. Li Z., Venkata H.K., Rangaraju P.R. Influence of silica flour-silica fume combination on the properties of high-performance cementitious mixtures at ambient temperature curing // Construction and Building Materials. – 2015. – Vol. 100. – P. 225–233.
39. Nanoclay-enhanced cement composition for deep well treatment: Patent US, no. 10065890B2, 2018.
40. ISO 10426-2:2003. Petroleum and natural gas industries – cements and materials for well cementing. P. 2: Testing of well cements. – 2003.
41. API Recommended Practice 10B-2-Recommended Practice for Testing Well Cements. 2nd ed. – Washington, American Petroleum Institute Publ., 2013. – 10B-2
42. ASTM D 3967-08. Standard test method for splitting tensile strength of intact rock core specimens. – West Conshohocken, USA, ASTM International, 2008.
43. Mehta P.K., Monteiro P.J.M. Concrete: microstructure, properties and materials. 4th ed. – California, McGraw-Hill Professional, 2013. – 675 p.
44. Hakamy A., Shaikh F.U.A., Low I.M. Characteristics of hemp fabric reinforced nanoclay-cement nanocomposites // Cement and Concrete Composites. – 2014. – Vol. 50. – P. 27–35.
45. Hakamy A., Shaikh F.U.A., Low I.M. Characteristics of nanoclay and calcined nanoclay-cement nanocomposites // Composites Part B: Engineering. – 2015. – Vol. 78. – P.174–184.
46. Stefanidou M., Papayianni I. Influence of nano-SiO₂ on the Portland cement pastes // Composites Part B: Engineering. – 2012. – Vol. 43. – № 6. – P. 2706–2710.
47. Sanjuán M.A., Muñoz-Martínez R. Oven-drying as preconditioning method for air permeability test on concrete // Materials Letters. – 1996. – Vol. 27. – № 4–5. – P. 263–268.
48. Mechanical behavior of activated nano silicate filled cement binders / S.S. Shebl, L. Allie, M.S. Morsy, H.A. Aglan // Journal of materials science. – 2009. – Vol. 44. – P. 1600–1606.
49. Hakamy A., Shaikh F.U.A., Low I.M. Thermal and mechanical properties of hemp fabric-reinforced nanoclay-cement nanocomposites // Journal of materials science. – 2014. – Vol. 49. – P. 1684–1694.

Информация об авторах

Мария Владимировна Нуцкова, кандидат технических наук, доцент кафедры бурения скважин, Санкт-Петербургский горный университет, Россия, 199106, г. Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия, 2. Nutskova_MV@pers.spmi.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3094-6289>

Мохаммад Алхаззаа, аспирант кафедры бурения скважин, Санкт-Петербургский горный университет, Россия, 199106, г. Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия, 2. s215139@stud.spmi.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2891-1709>

Поступила в редакцию: 26.09.2023

Поступила после рецензирования: 30.01.2024

Принята к публикации: 16.05.2024

REFERENCES

1. Curtis C., Kopper R., Decoster E., Guzman-Garcia A., Huggins C., Knauer L., Minner M., Kupsch N., Linares L., Rough H., Waite M. Heavy-oil reservoirs. *Oilfield review*, 2002, vol. 14, no. 3, pp. 30–51.
2. Kadochnikov V.G., Dvoynikov M.V. Development of technology for hydromechanical breakdown of mud plugs and improvement of well cleaning by controlled buckling of the drill string. *Applied Sciences*, 2022, vol. 12, no. 13, pp. 6460.
3. Kunshin A., Dvoynikov M., Timashev E., Starikov V. Development of monitoring and forecasting technology energy efficiency of well drilling using mechanical specific energy. *Energies*, 2022, vol. 15, no. 19, pp. 7408.
4. Lavrik A., Buslaev G., Dvoynikov M. Thermal stabilization of permafrost using thermal coils inside foundation piles. *Civil Engineering Journal*, 2023, vol. 9, no. 4, pp. 927–938.
5. Vorobyov S.V., Gorbunov P.A., Maksimenko O.V., Khabibullin D.Ya. Temperature regime of oil and gas bearing deposits of the northern part of the West Siberian plate. *Geology of oil and gas*, 2018, no. 5, pp. 29–35. (In Russ.)
6. Zakharov E.V., Kulibakina I.B. The geothermal regime of the subsoil is one of the main factors determining the degree of prospects of oil and gas basins. *Geology of oil and gas*, 1997, vol. 12, pp. 31–36. (In Russ.)

7. Costa B.L.S., Souza G.G., Freitas J.C.O., Araujo R.G.S., Santos P.H.S. Silica content influence on cement compressive strength in wells subjected to steam injection. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2017, vol. 158, pp. 626–633.
8. Dvoynikov M.V., Kuchin V.N., Mintzaev M.Sh. Development of viscoelastic systems and technologies for isolating water-bearing horizons with abnormal formation pressures during oil and gas wells drilling. *Journal of Mining Institute*, 2021, vol. 247, pp. 57–65. (In Russ.)
9. Luke K. Phase studies of pozzolanic stabilized calcium silicate hydrates at 180 °C. *Cement and concrete research*, 2004, vol. 34, no. 9, pp. 1725–1732.
10. Mahmoud A.A., Elkhatny S., Ahmed A., Gajbhiye R. Influence of nanoclay content on cement matrix for oil wells subjected to cyclic steam injection. *Materials*, 2009, vol. 12, no. 9, pp. 1452.
11. Mitchell R.F., Miska S.Z. *Fundamentals of drilling engineering*. Texas, Richardson Publ., 2011. Ch. 4. 139 p.
12. Moradi S.T., Nikolaev N.I. Considerations of well cementing materials in high-pressure, high-temperature conditions. *International Journal of Engineering*, 2016, vol. 29, no. 9, pp. 1214–1218.
13. Vu M.H., Sulem J., Laudet J.B. Effect of the curing temperature on the creep of a hardened cement paste. *Cement and concrete research*, 2012, vol. 42, no. 9, pp. 1233–1241.
14. Wang W.C. Compressive strength and thermal conductivity of concrete with nanoclay under various high temperatures. *Construction and Building Materials*, 2017, vol. 147, pp. 305–311.
15. Zimina D.A., Zhapkhandaev C.A., Petrov A.A. Analysis of the effect of nanosilicates on the strength and porosity of cement stone. *Key Engineering Materials*, 2020, vol. 854, pp. 175–181.
16. Bahafid S., Ghabezloo S., Faure P., Duc M., Sulem J. Effect of the hydration temperature on the pore structure of cement paste: experimental investigation and micromechanical modelling. *Cement and Concrete Research*, 2018, vol. 111, pp. 1–14.
17. Huang S., Hu M., Huang Y., Cui N., Wang W. A new model for optimal mechanical and thermal performance of cement-based partition wall. *Materials*, 2018, vol. 11, no. 4, pp. 615.
18. Kang S.H., Lee J.H., Hong S.G., Moon J. Microstructural investigation of heat-treated ultra-high-performance concrete for optimum production. *Materials*, 2017, vol. 10, no. 9, pp. 1106.
19. Karim M.R., Chowdhury F.I., Zayed H., Saidurd M.R. Effect of elevated temperatures on compressive strength and microstructure of cement paste containing palm oil clinker powder. *Construction and Building Materials*, 2018, vol. 183, pp. 376–383.
20. Ranachowski Z., Ranachowski P., Dębowski T., Gorzelańczyk T., Schabowicz K. Investigation of structural degradation of fiber cement boards due to thermal impact. *Materials*, 2019, vol. 12, no. 6, pp. 944.
21. Silva I.B., Martinelli A.E., Souza W.R.M., Freitas J.C.O., Rodrigues M.A.F. Dilatometric behavior and crystallographic characterization of Portland-polyurethane composites for oil well high-temperature cementing applications. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2018, vol. 169, pp. 553–559.
22. Szeląg M. The influence of metakaolinite on the development of thermal cracks in a cement matrix. *Materials*, 2018, vol. 11, no. 4, pp. 520.
23. Wang W., Liu X., Guo L., Duan P. Evaluation of properties and microstructure of cement paste blended with metakaolin subjected to high temperatures. *Materials*, 2019, vol. 12, no. 6, pp. 941.
24. Kovalchuk V.S., Nikolaev N.I. Carbon additives for high-quality well cementing. *IOP Conference Series (Earth and Environmental Science): IV International Scientific Conference (Agribusiness, Environmental Engineering and Biotechnologies)*. Krasnoyarsk, IOP Publ., 2021. Vol. 677, no. 5, pp. 052035.
25. Dvoynikov M.V., Sidorkin D.I., Kunshin A.A., Kovalev D.A. Development of hydraulic turbodrills for deep well drilling. *Applied Sciences*, 2021, vol. 11, no. 16, pp. 7517.
26. Ichim A., Teodoru H.C. Investigations on the surface well cement integrity induced by thermal cycles considering an improved overall transfer coefficient. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2017, vol. 154, pp. 479–487.
27. Nelson E.B., Guillot D. *Well cementing*. Texas, Schlumberger, Sugar Land, 2006. 799 p.
28. Redrovan P., Kuchin V., Dvoynikov M. Development of technology for increasing well completion during drilling in the abnormal reservoir pressures intervals. *SHS Web of Conferences. First International Scientific Seminar (Circumpolar Studies)*. EDP Sciences, 2020, vol. 84, pp. 5.
29. Zimina D.A., Nutskova M.V. Research of technological properties of cement slurries based on cements with expanding additives, Portland and magnesia cement. *IOP Conference Series (Materials Science and Engineering)*. St Petersburg, 2019. Vol. 666, no. 1, pp. 012066.
30. Eilers L.H., Root R.L. Long-term effects of high temperature on strength retrogression of cements. *Proc. of the Annual California Regional Meeting of the Society of Petroleum Engineers of AIME*. Long Beach, California, 1976. pp. SPE-5871-MS.
31. Iverson B., Maxson J., Bour D. Strength retrogression in cements under high temperature conditions. *Proc. of the thirty-fifth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*. Stanford, California, 2010. pp. SGP-TR-188.
32. Leusheva E., Alikhanov N., Morenov V. Barite-free muds for drilling-in the formations with abnormally high pressure. *Fluids*, 2022, vol. 7, no. 8, pp. 268.
33. Mardashov D.V. Development of blocking compositions with a bridging agent for oil well killing in conditions of abnormally low formation pressure and carbonate reservoir rocks. *Journal of Mining Institute*, 2021, vol. 251, pp. 667–677. (In Russ.)
34. Nikolaev N.I., Leusheva E.L. Low-density cement compositions for well cementing under abnormally low reservoir pressure conditions. *Journal of Mining Institute*, 2019, vol. 236, pp. 194–200. (In Russ.)
35. Richardson I.G. The calcium silicate hydrates. *Cement and concrete research*, 2008, vol. 38, no. 2, pp. 137–158.
36. Leusheva E.L., Alikhanov N.T., Brovkina N.N. Study on the rheological properties of barite-free drilling mud with high density. *Journal of Mining Institute*, 2022, vol. 258, pp. 976–985. (In Russ.)
37. Sanjuán M.A., Argiz C., Gálvez J.C., Moragues A. Effect of silica fume fineness on the improvement of Portland cement strength performance. *Construction and Building Materials*, 2015, vol. 96, pp. 55–64.

38. Li Z., Venkata H.K., Rangaraju P.R. Influence of silica flour–silica fume combination on the properties of high-performance cementitious mixtures at ambient temperature curing. *Construction and Building Materials*, 2015, vol. 100, pp. 225–233.
39. Rahman M.K., Murtaza M., Al-Majed A.A., Al-Zahrani M.M. *Nanoclay-enhanced cement composition for deep well treatment*. Patent US, no. 10065890B2, 2018.
40. ISO 10426-2:2003. *Petroleum and natural gas industries – cements and materials for well cementing. P. 2: Testing of well cements*. 2003.
41. *API Recommended Practice 10B-2-Recommended Practice for Testing Well Cements*. 2nd ed. Washington, American Petroleum Institute Publ. 10B-2, 2013.
42. ASTM D 3967-08. *Standard test method for splitting tensile strength of intact rock core specimens*. West Conshohocken, USA, ASTM International, 2008.
43. Mehta P.K., Monteiro P.J.M. *Concrete: microstructure, properties and materials*. 4th ed. California, McGraw-Hill Professional, 2013. 675 p.
44. Hakamy A., Shaikh F.U.A., Low I.M. Characteristics of hemp fabric reinforced nanoclay-cement nanocomposites. *Cement and Concrete Composites*, 2014, vol. 50, pp. 27–35.
45. Hakamy A., Shaikh F.U.A., Low I.M. Characteristics of nanoclay and calcined nanoclay-cement nanocomposites. *Composites Part B: Engineering*, 2015, vol. 78, pp. 174–184.
46. Stefanidou M., Papayianni I. Influence of nano-SiO₂ on the Portland cement pastes. *Composites Part B: Engineering*, 2012, vol. 43, no. 6, pp. 2706–2710.
47. Sanjuán M.A., Muñoz-Martínez R. Oven-drying as preconditioning method for air permeability test on concrete. *Materials Letters*, 1996, vol. 27, no. 4–5, pp. 263–268.
48. Shebl S.S., Allie L., Morsy M.S., Aglan H.A. Mechanical behavior of activated nano silicate filled cement binders. *Journal of materials science*, 2009, vol. 44, pp. 1600–1606.
49. Hakamy A., Shaikh F.U.A., Low I.M. Thermal and mechanical properties of hemp fabric-reinforced nanoclay-cement nanocomposites. *Journal of materials science*, 2014, vol. 49, pp. 1684–1694.

Information about the authors

Mariia V. Nutskova, Cand. Sc., Associate Professor, Saint Petersburg Mining University, 2, 21 line Vasilyevsky Island, Saint Petersburg, 199106, Russian Federation. Nutskova_MV@pers.spmi.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3094-6289>

Mohammad Alhazzaa, Postgraduate Student, Saint Petersburg Mining University, 2, 21 line Vasilyevsky Island, Saint Petersburg, 199106, Russian Federation. s215139@stud.spmi.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2891-1709>

Received: 26.09.2023

Revised: 30.01.2024

Accepted: 16.05.2024

УДК 546.62+546.05

DOI: 10.18799/24131830/2024/8/4601

Шифр специальности ВАК: 02.00.01

Сорбционные свойства сорбента, полученного путем модифицирования оксигидроксида алюминия ионами серебра, на модельных растворах

К.И. Мачехина¹✉, Е.Н. Грязнова², П.В. Абрамова¹,
А.В. Пуставалов¹, Ю.Ю. Мирошниченко¹

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск

² ООО «Рубиус», Россия, г. Томск

✉ machekhinaKsu@tpu.ru

Аннотация. Актуальность. В настоящее время технологии водоподготовки, состоящие из модулей, последовательность которых в схеме очистки может меняться в зависимости от источника водоснабжения и целей очистки, являются универсальными. Стадия сорбционной очистки применяется практически в каждой технологии. При очистке сточных вод сорбция применяется как основная стадия водоподготовки, для получения питьевой воды из природных источников стадию сорбционной очистки применяют в качестве доочистки. Стабильность работы при разной температуре воды, невысокая стоимость, механическая прочность, возможность регенерации сорбентов и удобство эксплуатации делает актуальным проблему модифицирования существующих сорбентов для увеличения их селективности и сорбционной емкости. **Цель.** Исследовать механизм адсорбции и сорбционные возможности полученного при модифицировании AlOOH ионами серебра сорбента по отношению к неорганическим ионам и органическим веществам. **Объект.** Оксигидроксид алюминия, модифицированный ионами серебра. **Методы.** Рентгенофазовый анализ, метод тепловой десорбции азота, фотоколориметрия, просвечивающая электронная микроскопия. **Результаты и выводы.** Получен сорбент методом модификации оксигидроксида алюминия ионами серебра в растворе нитрата серебра с концентрацией ионов серебра 0,22 мас. %. Проведено исследование физико-химических свойств полученного сорбента рентгенофазовым анализом, просвечивающей электронной микроскопией и методом тепловой десорбции азота. В результате этого были определены его фазовый состав и удельная поверхность. Определены кинетические параметры процесса сорбции ионов кремния, железа и органических веществ на модифицированном сорбенте. Получены изотермы сорбции неорганических ионов и органических веществ на оксигидроксида алюминия, модифицированном ионами серебра. Изотермы сорбции обработаны в координатах Ленгмюра и Фрейндлиха. Проведенное исследование показало, что полученный сорбент может использоваться в технологиях водоподготовки подземных вод, характеризующихся повышенными концентрациями органических веществ.

Ключевые слова: сорбция, ионы серебра, оксигидроксид алюминия, органические вещества, водоподготовка

Для цитирования: Сорбционные свойства сорбента, полученного путем модифицирования оксигидроксида алюминия ионами серебра, на модельных растворах / К.И. Мачехина, Е.Н. Грязнова, П.В. Абрамова, А.В. Пуставалов, Ю.Ю. Мирошниченко // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 8. – С. 18–28. DOI: 10.18799/24131830/2024/8/4601

UDC 546.62+546.05

DOI: 10.18799/24131830/2024/8/4601

Sorption properties of the sorbent obtained by modifying aluminum oxyhydroxide with silver ions on model solutions

K.I. Machekhina¹✉, E.N. Gryaznova², P.V. Abramova¹,
A.V. Pustavalov¹, Yu.Yu. Miroshnichenko¹

¹ National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

² Rubius, Tomsk, Russian Federation

✉machekhinaKsu@tpu.ru

Abstract. Relevance. Nowadays water treatment technologies are universal. They consist of modules, the sequence of which may vary in the treatment scheme. It depends on the source of water supply and the purposes of treatment. The sorption purification stage is used in technology very often. Sorption is used as the main stage of water treatment for treating wastewater. Also it is used as a post-treatment stage to obtain drinking water from natural sources. Stability of operation at different water temperatures, low cost, mechanical strength, possibility of regenerating sorbents and ease of use make the problem of modifying existing sorbents urgent to increase their selectivity and sorption capacity. **Aim.** To investigate the adsorption mechanism and sorption capabilities of the sorbent obtained by modifying AlOOH with silver ions in relation to inorganic ions and organic substances. **Methods.** X-ray phase analysis, method of thermal desorption of nitrogen, photocolourimetry, transmission electron microscopy. **Results and conclusions.** The sorbent was obtained by modifying aluminum oxyhydroxide with silver ions in a solution of silver nitrate with a silver ion concentration of 0.22 wt %. The physicochemical properties of the resulting sorbent were studied by X-ray phase analysis, transmission electron microscopy and the method of thermal desorption of nitrogen. The authors have determined phase composition and specific surface area as well as sorption kinetic parameters. They obtained sorption isotherms of inorganic ions and organic substances on aluminum oxyhydroxide modified with silver ions. Sorption isotherms were processed in Langmuir and Freundlich coordinates. The study showed that the resulting sorbent can be used in groundwater treatment technologies characterized by increased concentrations of organic substances.

Keywords: sorption, silver ions, aluminum oxyhydroxide, organic substances, water treatment

For citation: Machekhina K.I., Gryaznova E.N., Abramova P.V., Pustavalov A.V., Miroshnichenko Yu.Yu. Sorption properties of the sorbent obtained by modifying aluminum oxyhydroxide with silver ions on model solutions. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 8, pp. 18–28. DOI: 10.18799/24131830/2024/8/4601

Введение

Работа является продолжением исследования сорбционных свойств сорбента, полученного модифицированием AlOOH ионами марганца [1, 2], меди и серебра. В работе [1] были исследованы сорбционные свойства исходного оксигидроксида алюминия на модельных растворах, содержащих силикат ионы и ионы трехвалентного железа. Максимальная сорбционная емкость по отношению к ионам железа и ионам кремния составляет 10 и 38 мг/г, соответственно [1]. Сравнение сорбционных свойств исходного AlOOH и активированного угля показало, что степень извлечения ионов железа и ионов кремния для оксигидроксида алюминия выше, чем для активированного угля. Однако полученный нановолокнистый сорбент показывает низкую степень извлечения органических веществ гумусового происхождения. В работе [2] исследовали степень извлечения ионов кремния и железа

сорбентами, полученными в результате модифицирования исходного AlOOH ионами марганца и меди (II). Для ионов кремния степень извлечения возрастает на 10 %, для сорбента, модифицированного ионами марганца, и на 3 % – ионами меди (II), соответственно. Возможность сорбировать другие компоненты подземных вод на описанных сорбентах не исследовалась.

Перечень компонентов, необходимых для удаления из подземных вод с целью получения питьевой воды, определяется исходным составом источника водоснабжения. Согласно мониторингу подземных вод Западной Сибири [3] основными веществами, значения концентраций которых превышает нормативные для питьевой воды, являются неорганические соединения железа, марганца, кальция, магния, кремния и органические вещества, что определяется геологией указанных территорий [4].

В настоящее время существует огромное количество технологий очистки воды [5], каждая из которых имеет свои преимущества и недостатки. Базовыми стадиями любой очистки являются: окисление, отстаивание и фильтрование. Для вод сложного состава [6], в которых при окислении образуются устойчивые коллоидные системы, лимитирующей стадией водоподготовки является стадия отстаивания. Процесс осаждения окисленных примесей связан со снижением их агрегативной и седиментационной устойчивости. Для этого в технологиях водоподготовки используют различные методы: ультразвуковую обработку, электроразрядные технологии [7], добавление коагулянтов [8] и сорбентов. Среди перечисленных методов использование сорбентов имеет ряд преимуществ: невысокую стоимость, простоту и удобство эксплуатации. Особенно это представляет интерес для отдаленных северных регионов, в которых нет централизованного водоснабжения. Кроме этого, небольшие фильтрующие установки, заполненные сорбентом, удобны в эксплуатации на стадии доочистки, когда расход воды составляет до 1 м^3 в неделю.

Анализ литературных данных [9, 10] показал, что получение сорбентов, которые будут отличаться своей универсальностью по отношению к разнообразию примесей, присутствующих в водах различного происхождения, и будут обладать новыми улучшенными сорбционными свойствами, является актуальным для технологии водоподготовки. Различные методы модифицирования сорбентов, состоящих из AlOOH или Al_2O_3 , представлены в работах [11–18]. Авторы работы [19] исследовали каталитические и адсорбционные свойства пористых функциональных материалов на основе оксидов кремния и алюминия для очистки сред различного состава. Установлено, что добавление наночастиц кобальта, меди и железа в высококремнистые цеолиты повышает селективность к аргону за счет экранирования наночастицами центров адсорбции кислорода. В работе [20] исследованы сорбционные и каталитические свойства сорбентов на основе оксида железа (III) и оксида алюминия и для процессов фильтрации и очистки от загрязняющих веществ. Установлено, что максимальную активность проявляют мезопористые пленки на основе вышеуказанных оксидов. В работе [21] исследован процесс сорбции ионов тяжелых металлов (никель, кадмий, цинк) на сорбенте, в основе которого используется оксид алюминия. Исследуя механизм сорбции, авторы предполагают как физическую адсорбцию ионов на поверхности пористого оксида алюминия, так и хемосорбцию. В работе [22] исследован процесс сорбции оксида алюминия ионами серебра для получения сорбента, применяемого для удаления микроорганизмов из стоячей воды.

Авторами установлено, что обеззараживание воды нанокompозитами на основе полученного сорбента происходит эффективнее, чем нанокompозитами на основе органических матриц (активированный уголь, карбоксильный катионообменник). Авторы делают заключение, что модифицирование AlOOH ионами серебра для получения сорбента, который можно будет применять для очистки жидких сред, является перспективным. Трудно удаляемыми примесями являются частицы дисперсной фазы, которые обладают повышенной агрегативной и седиментационной устойчивостью. Применение AlOOH для удаления таких частиц из растворов исследовано недостаточно.

Объекты и методика исследования

Сорбент. В качестве исходного материала использовали нановолокнистый оксигидроксид алюминия (AlOOH), полученный по методике, описанной в работах [1, 12]. Для получения нанопорошка алюминия применяли метод электрического взрыва проводника (ЭВП) в среде аргона. Последующее его модифицирование ионами серебра осуществляли совместно с процессом роста нановолокон AlOOH по следующей методике: готовили раствор нитрата серебра квалификации ч.д.а. объемом 200 мл с концентрацией 0,22 мас. %. В приготовленный раствор помещали нанопорошок алюминия массой $0,200 \pm 0,005 \text{ г}$. В результате протекания реакции термогидролиза ($T=60 \text{ }^\circ\text{C}$, $t=8 \text{ ч}$) выпадал осадок, который отделяли от раствора, затем промывали дистиллированной водой и сушили при $105 \text{ }^\circ\text{C}$ до постоянной массы [2].

Исследование морфологических характеристик полученных сорбентов проводили методом просвечивающей электронной микроскопии с использованием электронного микроскопа JEM-2100F (JEOL, Япония).

Методом тепловой десорбции азота с помощью прибора «Сорбтометр-М» (Россия) определяли площадь удельной поверхности полученного сорбента.

Для анализа фазового состава полученных образцов использовали рентгеновский дифрактометр Shimadzu XRD-7000S (Япония), диапазон углов сканирования составлял $20 \dots 80^\circ$ с шагом $0,5^\circ$ и скоростью сканирования 1 град/мин . Для получения хороших рентгенограмм образец измельчали растиранием в агатовой ступке агатовым пестиком (для исключения загрязнения пробы). Идентификацию фаз, входящих в состав сорбента, проводили рентгенофазовым анализом (РФА). Состав сорбента определяли, анализируя набор межплстинчатых расстояний и относительную интенсивность соответствующих линий на рентгенограмме.

Значения дзета-потенциала в исследуемом модельном растворе определяли на анализаторе Zetasizer Nano ZS (Malvern Instruments).

Процесс сорбции. Анализ сорбционной активности сорбента исследовали на модельном растворе. Методика приготовления модельного раствора запатентована и описана в работе [23]. Ввиду того, что полученный сорбент планируется применять в технологиях водоподготовки, состав модельного раствора определялся химическим составом подземных вод Томской области. Модельный раствор готовили путем растворения в дистиллированной воде гумата натрия, сульфата железа (II) и силиката натрия. Содержание органических веществ в модельном растворе составляло 4,0 мгО/л, ионов железа (III) и кремния – 6,7 и 25,6 мг/л соответственно. Корректировку pH осуществляли добавлением серной кислоты и гидроксида натрия.

Адсорбционные свойства адсорбентов измеряли в статическом режиме при различном времени контакта. Для этого 0,15 г адсорбента помещали в мерную колбу объемом 250 мл и доводили до метки модельным раствором с исходной концентрацией (C_0). Равномерное распределение сорбента по всему объему раствора осуществляли путем перемешивания на устройстве Lab-Shaker 110 со скоростью вращения 150 об/мин. Затем полученную дисперсную систему фильтровали через мембрану Millipore (США) (размер пор 400 нм) для отделения адсорбента от раствора. В растворе, оставшемся после фильтрования, анализировали концентрацию ионов железа, кремния и органических веществ.

Концентрацию ионов железа и кремния в растворе определяли методом фотоколориметрии, согласно РД 52.24.433-2005 и ГОСТ 4011-72, соответственно. Измерение оптической плотности проводили на спектрофотометре ПЭ-6100УФ фирмы ПРОМЭКОЛАБ. Содержание органических веществ оценивали согласно ГОСТ 31859-2012 фотометрическим методом по величине химического потребления кислорода (ХПК) с использованием анализатора «Флюорат-02-3М» фирмы «Люмекс».

Значение сорбционной емкости A_e (мг/г) рассчитывали по уравнению (1):

$$A_e = \frac{(C_{\text{исх}} - C_{\text{равн}}) V_{\text{р-ра}}}{m_{\text{сорб}}}, \quad (1)$$

где A_e – сорбционная емкость, мг/г; $C_{\text{исх}}$ и $C_{\text{равн}}$ – исходная и равновесная концентрации ионов в растворе, мг/л; $m_{\text{сорб}}$ – масса сорбента, г; $V_{\text{р-ра}}$ – объем раствора, л.

Кинетические параметры определяли с использованием моделей псевдо-первого и псевдо-второго порядка. Уравнение псевдо-первого порядка имеет вид:

$$\ln(A_e - A_t) = \ln(A_e) - k_1 t, \quad (2)$$

где k_1 – константа скорости уравнения псевдо-второго порядка, мин^{-1} ; A_e и A_t – сорбционные емкости при равновесии и времени t , соответственно.

Уравнение псевдо-второго порядка имеет следующий вид:

$$\frac{t}{A_t} = \frac{1}{k_2 A_e^2} + \frac{t}{A_e}, \quad (3)$$

где k_2 – константа скорости уравнения псевдо-второго порядка, г/(мг·мин).

Обработку изотерм сорбции проводили в координатах уравнений Ленгмюра и Фрейндлиха [24], которые представлены в уравнениях (4) и (5) соответственно

$$\frac{C_e}{A_e} = \frac{C_e}{A_m} + \frac{1}{A_m b}; \quad (4)$$

$$\ln(A_e) = \frac{1}{n} \ln(C_e) + \ln(K_F), \quad (5)$$

где A_e – количество вещества, адсорбированного 1 м² поверхности (или 1 г) адсорбента (удельная адсорбция вещества), г/м² или г/г; A_m – количество вещества, адсорбированного 1 м² поверхности (или 1 г) адсорбента при максимальном ее заполнении, г/м² или г/г; C_e – равновесная концентрация вещества в растворе, мг/л; b – константа уравнения Ленгмюра, характеризующая энергию взаимодействия адсорбата и адсорбента; K_F и n – константы уравнения Фрейндлиха.

Результаты исследования и их обсуждение

В работе [12] были проведены эксперименты по модифицированию AlOOH ионами марганца и меди. Поэтому для исследования сорбционных процессов были выбраны следующие образцы: 1 – не модифицированный AlOOH (образец сравнения); 2 – с концентрацией ионов марганца 0,4 мас. %; 3 – с концентрацией ионов меди (II) 0,4 мас. %. Для получения сорбента, модифицированного ионами серебра, концентрацию серебра варьировали от 0,22 до 2,74 мас. %. Было установлено, что с увеличением содержания ионов серебра в растворе увеличивается содержание оксидов серебра и в образце (2,74 мас. %) появляется металлическое серебро (рис. 1). Удельная поверхность модифицированного оксигидроксида алюминия (0,22 мас. %) снижается с 245,0 до 220,7 м²/г (2,74 мас. %). Поэтому для дальнейших исследований из всех образцов, полученных модифицированием AlOOH ионами серебра, был выбран один образец – с концентрацией ионов серебра 0,22 мас. %.

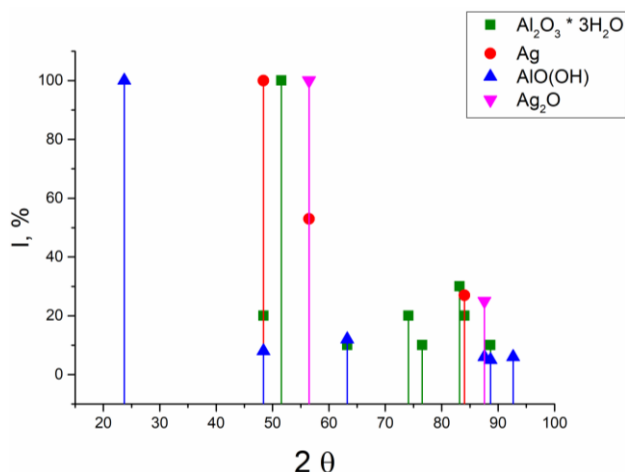


Рис. 1. Рентгенограмма сорбента на основе оксигидроксида алюминия, полученного путем модифицирования ионами серебра с концентрацией 2,74 мас. %

Fig. 1. XRD patterns sorbent of aluminum oxyhydroxide modified with silver ions with a concentration of 2.74 wt %

Значения удельной поверхности и фазовой состав образцов приведены в табл. 1.

Таблица 1. Характеристики адсорбентов

Table 1. Parameters of adsorbents

Образец Sample	AlOOH	Модифицированный AlOOH AlOOH modified with			
		ионами Mn^{2+} с концентрацией 0,4 мас. % 0,4 wt % Mn^{2+}	ионами Cu^{2+} с концентрацией 0,4 мас. % 0,4 wt % Cu^{2+}	ионами Ag^+ с концентрацией 0,22 мас. % 0,22 wt % Ag^+	
Удельная поверхность при 105 °C, м ² /г Specific surface area at 105°C, m ² /g		232	255	250	245
Фазовый состав образ- цов после термической обработки при 105 °C, % Phase composi- tion of samples after heat treatment at 105°C, %	AlOOH	63,5	65,8	72,4	60
	Al(OH) ₃	36	35,8	26,9	27
	Al	0,5	0,7	0,7	–
	Ag ₂ O	–	–	–	13

Удельная площадь поверхности образца, модифицированного ионами серебра (образец 4), увеличилась в сравнении с исходным образцом (табл. 1).

Следовательно, ионы серебра, так же как и ионы марганца и меди [2, 12], в малых концентрациях тормозят рост зародышей кристаллов оксигидроксида алюминия за счет сорбции указанных ионов на гранях зародышей кристаллической фазы AlOOH. В результате происходит образование новых зародышей, что приводит к увеличению площади удельной поверхности сорбента. При этом для образца с концентрацией ионов серебра 0,4 мас. %, происходит снижение значения площади удельной поверхности до 239 м²/г, что связано с возрастанием радиуса иона серебра, по сравнению с радиусами ионов меди и марганца. В связи с этим для исследования сорбционных свойств оксигидроксида алюминия, модифицированного ионами Ag^+ , был выбран образец с содержанием ионов серебра 0,22 мас. %.

На рис. 2 представлены микрофотографии полученных образцов.

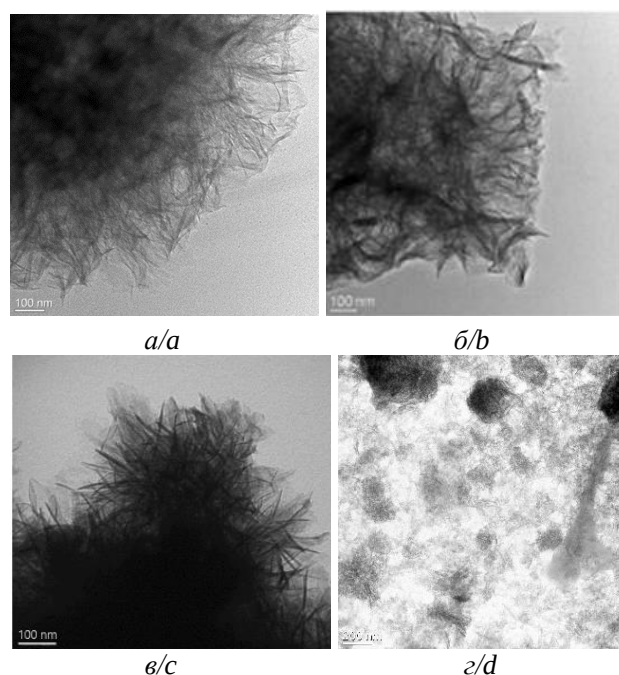


Рис. 2. Микрофотографии образцов: а) исходный AlOOH; б) AlOOH, модифицированный ионами марганца (0,4 мас. %); в) AlOOH, модифицированный ионами меди (II) (0,4 мас. %); г) AlOOH, модифицированный ионами серебра (0,22 мас. %)

Fig. 2. Microphotographs of samples: a) AlOOH; b) AlOOH modified with manganese ions (0,4 wt %); c) AlOOH modified with copper (II) ions (0,4 wt %); d) AlOOH modified with silver ions (0,22 wt %)

Как видно из микрофотографий, морфология образца, модифицированного ионами серебра, отличается от структуры остальных образцов. Крупные агломераты на рис. 2, г – это оксид серебра с размером частиц до 100 нм. Однако видно, что все

образцы обладают волокнистой структурой с относительно равномерным распределением ионов модификатора по всему объему пористого AlOOH . Исследование кинетических параметров сорбции для определения времени, при котором происходит максимальное достижение сорбционной емкости, проводили в статическом режиме. Из результатов, представленных на рис. 3, было определено, что это время составляет 120 минут для неорганических ионов и органических веществ. Полученное значение использовали при проведении последующих экспериментов.

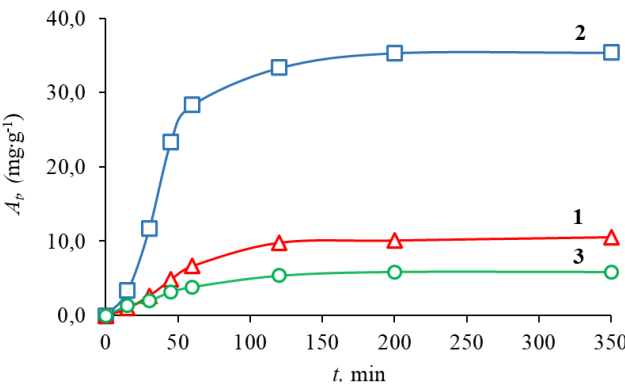


Рис. 3. Кинетическая зависимость процесса сорбции: 1 – ионов железа ($\text{Fe}_{\text{общ}}$); 2 – ионов кремния (Si); 3 – органических веществ (ХПК) на AlOOH , модифицированном ионами серебра (образец 4)
Fig. 3. Kinetic dependence of sorption of: 1 – iron ions (Fe_{total}); 2 – silicon ions (Si); 3 – organic substances (COD) on AlOOH modified with silver ions (sample 4)

Для определения движущей силы процесса сорбции были проанализированы кинетические зависимости (рис. 3) и рассчитаны параметры с использованием моделей псевдо-первого порядка ($\ln(A_e - A_t)$ от t) и псевдо-второго порядка (t/A_t от t). Результаты вычислений по уравнениям (2) и (3) представлены в табл. 2. Высокие коэффициенты корреляции 0,97...0,99 (табл. 2) указывают на то, что полученные кинетические зависимости соответствуют уравнению псевдо-первого порядка. Исходя из этого, можно сделать вывод, что процесс адсорбции ограничивается скоростью взаимодействия адсорбата с адсорбентом и процесс диффузии предшествует сорбции. Для понимания механизма сорбции и определения максимальной сорбционной емкости строили изотермы сорбции. Эксперимент проводили в статическом режиме на модельном растворе. Массу сорбента варьировали от 2,0 до 700 мг. Полученные изотермы сорбции представлены на рис. 4, 5.

Таблица 2. Кинетические параметры, рассчитанные по уравнениям псевдо-первого и псевдо-второго порядка
Table 2. Kinetic parameters calculated by pseudo-first and pseudo-second order equations

Адсорбат Adsorbate	$A_e \text{ exp, мг·г}^{-1} \text{ (mg·g}^{-1}\text{)}$	Псевдо-первый порядок Pseudo-first-order			Псевдо-второй порядок Pseudo-second-order		
		$k_1, \text{ мин}^{-1} \text{ (min}^{-1}\text{)}$	$A_e \text{ cal, мг·г}^{-1} \text{ (mg·g}^{-1}\text{)}$	R^2	$k_2, \text{ мин·г} \text{ (min·g)}$	$A_e \text{ cal, мг·г}^{-1} \text{ (mg·g}^{-1}\text{)}$	R^2
$\text{Fe}_{\text{общ}}/\text{Fe}_{\text{total}}$	10,3	0,022	12,0	0,97	0,00087	13,6	0,82
Si	35,4	0,0314	50,2	0,98	0,00037	43,7	0,83
Органические вещества (ХПК) Organic substances (COD)	5,9	0,014	6,1	0,99	0,00378	6,6	0,97

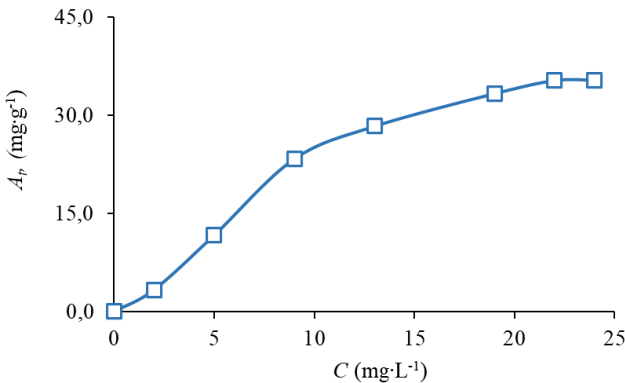


Рис. 4. Изотерма адсорбции ионов кремния на AlOOH (Ag)
Fig. 4. Isotherm of silicon ions adsorption on AlOOH (Ag)

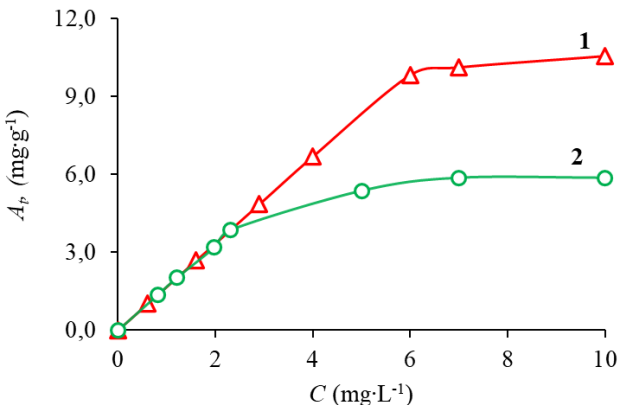


Рис. 5. Изотерма адсорбции: 1 – ионов железа и 2 – органических веществ на AlOOH (Ag)
Fig. 5. Isotherm of: 1 – iron ions and 2 – organic substances adsorption on AlOOH (Ag)

На основании полученных значений корреляции изотерм сорбции (табл. 3) можно сделать вывод, что изотерма сорбции ионов кремния и органических веществ хорошо аппроксимируется уравнением Ленгмюра, что говорит об образовании мономолекулярного слоя на отдельных активных центрах. Изотерма сорбции ионов железа лучше аппроксимируется уравнением Фрейндлиха, на основании чего можно сделать вывод об экспоненциальном распределении ионов железа на поверхности сорбента.

Таблица 3. Адсорбционные характеристики ионов (Ag) на AlOOH

Table 3. Adsorption parameters of (Ag) ions on AlOOH

Адсорбат Adsorbate	Модель Ленгмюра Langmuir model			Модель Фрейндлиха Freundlich model		
	$A_{\max}$, мг·г ⁻¹ (mg·g ⁻¹)	K , л·мг ⁻¹ (l·mg ⁻¹)	R^2	K_F	n	R^2
Fe _{общ} /Fe _{total}	16,1	0,2117	0,8942	1,4033	0,961	0,9829
Si	51,5	0,095	0,9946	1,4835	0,912	0,9855
Органические вещества (ХПК) Organic substances (COD)	8,0	0,3297	0,9773	1,2674	1,1185	0,9279

Для сравнения значений максимальной сорбционной емкости и характера сорбции на рис. 6 показаны изотермы сорбции ионов кремния для четырех исследуемых сорбентов.

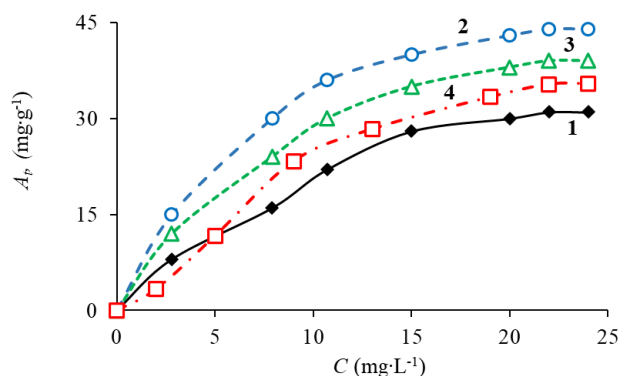


Рис. 6. Изотерма адсорбции ионов кремния на: 1 – AlOOH; 2 – AlOOH (Mn); 3 – AlOOH (Cu); 4 – AlOOH (Ag)

Fig. 6. Isotherm of ions silicon adsorption on: 1 – AlOOH; 2 – AlOOH (Mn); 3 – AlOOH (Cu); 4 – AlOOH (Ag)

Для образца 4, модифицированного ионами серебра, значение максимальной сорбционной емкости составило $A_m=35$ мг/г. Полученное значение незначительно превышает значение для исходного AlOOH ($A_m=31$ мг/г) и имеет меньшее значение,

чем для образцов, модифицированных ионами марганца ($A_m=43$ мг/г) и меди ($A_m=38$ мг/г). Для всех модифицированных образцов отмечается повышение сорбционной емкости по сравнению с немодифицированным образцом, что связано с увеличением площади удельной поверхности сорбента. Модельный раствор, который использовался для исследования сорбционных свойств, представляет коллоидный раствор желтого цвета с размером частиц дисперсной фазы от 30 до 170 нм и значением дзета-потенциала, равным -31 мВ. Отрицательное значение полученной величины можно объяснить тем, что растворимые гуминовые вещества в виде групп R- и кислотные остатки кремниевой кислоты встраиваются в адсорбционный слой мицеллы железа. Значение электрокинетического потенциала для исходного оксигидроксида алюминия составляет $+60$ мВ [12]. Модифицирование AlOOH ионами марганца, меди и серебра не приводит к значительному изменению дзета-потенциала, значения которого варьируются в пределах $+55...+62$ мВ. Поэтому мы предполагаем, что активные центры поверхности сорбентов заряжены положительно, что обеспечивает сорбцию отрицательно заряженных частиц дисперсной фазы модельного раствора за счет зарядовых взаимодействий.

Для оценки возможности применения сорбентов в качестве фильтрующей загрузки для глубокой сорбционной очистки после механического фильтрования и стадии аэрации проводились испытания образцов на подземной воде (табл. 4). Фильтрование проводили в динамическом режиме. Сорбент помещали в стеклянную трубочку диаметром 10 мм между мембранами (размер пор 400 нм). Высота загрузки составляла 100 мм. Проба воды из бака, установленного на высоте 2 м, поступала в резиновую трубку высотой 180 см, соединенную внизу со стеклянной трубкой, в которой находилась загрузка сорбента. Фильтрование осуществлялось самотеком. Скорость фильтрования составляла 0,05 л/ч.

Таблица 4. Химический состав воды с. Александровское (Томская область)

Table 4. Chemical composition of water in Aleksandrovskoe village (Tomsk region)

Компоненты Components	Исходный Initial	Состав пробы воды после сорбции на Composition of the water sample after sorption on				ПДК MPC
		AlOOH	AlOOH (Mn)	AlOOH (Cu)	AlOOH (Ag)	
Ед. изм./Units		мг/л/mg/l				
ХПК (мгО/л) COD (mgO ₂ /l)	7,2	2,4	2,2	2,3	1,8	5,0
Mn	1,1	менее 0,1/less than 0,1				0,1
Fe _{общ} /Fe _{total}	12,3	1,2	0,6	1,0	0,7	0,3
Si	21,7	12,4	7,9	9,4	10,3	10,0

Как видно из табл. 4, фильтрование воды через все сорбенты приводит к снижению концентрации анализируемых примесей. Использование сорбентов, модифицированных ионами марганца, меди и серебра, приводит к большему снижению концентраций указанных примесей, по сравнению с немодифицированным сорбентом. Максимальное снижение концентрации органических веществ показал образец, модифицированный ионами серебра (табл. 4). Степень извлечения составила 75 %. Из литературы [25] известно, что ионы серебра взаимодействуют с активными адсорбционными центрами гуминовых кислот ввиду физических характеристик свойств иона серебра, представляющего собой мягкую кислоту Льюиса. Применение такого сорбента для очистки воды, содержащей коллоидные соединения, в состав которых входят органические вещества гумусового происхождения, является целесообразным.

Следующим этапом нашей работы является подбор условий для регенерации модифицированных сорбентов, изучение процесса фильтрования под давлением и влияния на процесс адсорбции гранулирования сорбента с целью увеличения толщины слоя загрузки.

Заключение

В результате исследования процесса адсорбции ионов железа, кремния и органических веществ из

модельного раствора на AlOOH , модифицированном ионами серебра, определено время сорбции для неорганических ионов и органических веществ, которое составило 120 минут. На основании полученных кинетических зависимостей установлено, что процесс сорбции хорошо описывается уравнением кинетической модели псевдо-первого порядка. Полученная изотерма адсорбции для ионов кремния и органических веществ аппроксимируется уравнением Ленгмюра, что предполагает образование мономолекулярного слоя на отдельных активных центрах. Изотерма сорбции ионов железа лучше аппроксимируется уравнением Фрейндлиха, что говорит о том, что сначала сорбция ионов железа происходит на активных центрах с максимальной энергией. Показано, что модифицирование ионами серебра оксигидроксида алюминия не приводит к перезарядке поверхности оксигидроксида алюминия. Активные центры на поверхности полученного модифицированного сорбента обладают положительным зарядом, что обеспечивает сорбцию отрицательно заряженных частиц. Проведенное исследование показало, что сорбент, полученный на основе AlOOH , модифицированного ионами серебра, может использоваться в технологиях водоподготовки подземных вод, характеризующихся повышенными концентрациями органических веществ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сорбционная очистка модельных растворов от ионов железа и кремния с применением оксигидроксида алюминия / К.И. Мачехина, Е.Н. Грязнова, Л.Р. Меринова, П.В. Абрамова // Вестник ЮУрГУ. Серия «Химия». – 2022. – Т. 14. – № 1. – С. 79–87. DOI: 10.14529/chem190202
2. Мачехина К.И., Грязнова Е.Н., Абрамова П.В. Сорбционная очистка растворов от ионов кремния с применением оксигидроксида алюминия модифицированного ионами марганца и меди // Вестник ЮУрГУ. Серия «Химия». – 2023. – Т. 15. – № 1. – С. 75–82. DOI: 10.14529/chem230108
3. Iron oxidation in different types of groundwater of Western Siberia / L.V. Serikov, E.A. Tropina, L.N. Shiyani, F.H. Frimmel // J. Soils Sediments. – 2009. – Vol. 9 (2). – P. 103–110. DOI: 10.1007/s11368-009-0069-x
4. Geochemical groundwater peculiarities of Paleogene sediments in S-E Western Siberia artesian basin / A.A. Balobanenko, V.A. I'gotin, E.M. Dutova, D.S. Pokrovsky // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. – 2016. – Vol. 43. – P. 012030. DOI: 10.1088/1755-1315/43/1/012030
5. Saleh Tawfik A., Mustaqeem Mujahid, Khaled Mazen. Developing water treatment technologies in removing heavy metal ions from wastewater: a review // Environmental Nanotechnology Monitoring and Management. – 2021. – Vol. 17 (6). – P. 100617. DOI: 10.1016/j.enmm.2021.100617
6. Shiyani L.N., Machekhina K.I., Frantsuzskaya E.O. Groundwater sources in the West Siberian region: chemical composition, analysis, and water treatment technologies // Cleaner Engineering and Technology. – 2022. – Vol. 7. – P. 100441 (1–8). DOI: 10.1016/j.clet.2022.100441
7. Oxidation of aqueous organic molecules in gas-phase pulsed corona discharge affected by sodium dodecyl sulphate: Explanation of variability / L. Onga, R. Boroznjak, I. Kornev, S. Preis // Journal of Electrostatics. – 2021. – Vol. 111. – P. 103581. DOI: 10.1016/j.elstat.2021.103581
8. Removal of refractory organics in wastewater by coagulation/flocculation with green chlorine-free coagulants / H. Zhang, H. Lin, O. Li, C. Cheng, H. Shen, Z. Zhang, H. Wang // Sci. Total Environ. – 2021. – Vol. 787. – P. 147654. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.147654
9. Tran H.N. Adsorption technology for water and wastewater treatments // Water. – 2023. – Vol. 15. – P. 2857. DOI: 10.3390/w15152857
10. Xiangbin Liu Research progress on treatment technology of produced water by adsorption method // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. – 2019. – Vol. 472. – P. 012082. DOI: 10.1088/1757-899X/472/1/0120
11. Исследование механизма адсорбции противоопухолевых лекарств на железосодержащих наночастицах / В.А. Митькина, Г.Г. Савельев, Т.А. Юрмазова, А.И. Галанов, Н.А. Яворовский // Известия Томского политехнического университета. – 2010. – Т. 317. – № 3. – С. 29–33.

12. Грязнова Е.Н. Технология получения модифицированного ионами марганца (II) оксигидроксида алюминия нановолокнистой структуры и материалов на его основе: дис. ... канд. техн. наук. – Томск, 2015. – 135 с.
13. Clinical experience of Al₂O₃ ceramics as a surgical implant / Y. Ooi, T. Suka, Y. Satoh, K. Shibuya, I. Ohki, M. Masubuchi, K. Mikanagi // *International Orthopedics*. – 1982. – Vol. 6 (2). – P. 93–102. DOI: 10.1007/BF00268651
14. Разработка комплекса безреагентной очистки воды / В.А. Хан, М.И. Лернер, В.Ф. Мышкин, А.А. Цхе // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2013. – № 86 (02). – С. 379–391.
15. Бакина О.В. Закономерности превращения нанопорошков алюмонитридной композиции в водных средах: автореф. дис. ... канд. хим. наук. – Томск, 2012. – 22 с.
16. Hokkanen S., Bhatnagar A., Sillanpaa M. A review on modification methods to cellulose-based adsorbents to improve adsorption capacity // *Water Research*. – 2016. – Vol. 91. – P. 156–173. DOI: 10.1016/j.watres.2016.01.008
17. Surface modification of plant fibers using environment friendly methods for their application in polymer composites, textile industry and antimicrobial activities: a review / S. Kalia, K. Thakur, A. Celli, M. Kiechel, C. Schauer // *Journal of Environmental Chemical Engineering*. – 2013. – Vol. 1 (3). – P. 97–112. DOI: 10.1016/j.jece.2013.04.009
18. Innovative codeposition of a Ag–Al₂O₃ layer: an attractive combination of high durability and lack of cytotoxicity for public space applications / M. Calovi, S. Meschini, M. Condello, S. Rossi // *ACS Omega*. – 2022. – Vol. 7 (29). – P. 25650–25662. DOI: 10.1021/acsomega.2c02872
19. Gordienko M.G., Kon'kova T.V., Menshutina N.V. Influence of composition on the mesoporous structure of the silicagel prepared by sol–gel method // *Journal of Sol-Gel Science and Technology*. – 2016. – Vol. 79 (1). – P. 59–66. DOI: 10.1007/s10971-016-4015-2
20. Magnetic mesoporous catalytic and adsorption active FeAl₂O₃ films / V.I. Mikhaylov, E.F. Krivoschapkina, V.A. Belyy, S.I. Isaenko, M.V. Zhukov, E.Yu. Gerasimov, P.V. Krivoschapkin // *Microporous and Mesoporous Materials*. – 2019. – Vol. 284. – P. 225–234. DOI: 10.1016/j.micromeso.2019.04.003
21. Ligand-immobilized spent alumina catalyst for effective removal of heavy metal ions from model contaminated water / M. Hojamberdiev, S.S. Daminova, Z.C. Kadirova, K.T. Sharipov, F. Mtalo, M. Hasegawa // *Journal of Environmental Chemical Engineering*. – 2018. – Vol. 6 (4). – P. 4623–4633. DOI: 10.1016/j.jece.2018.06.070
22. Золотухина Е.В., Спиридонов Б.А., Федянин В.И. Обеззараживание воды нанокompозитами на основе пористого оксида алюминия и соединений серебра // Сорбционные и хроматографические процессы. – 2010. – Т. 10. – Вып. 1. – С. 78–85.
23. Способ приготовления модельного коллоидного раствора: пат. № 2502556, Российская Федерация; заявл. 12.07.2012; опубл. 27.12.2013, Бюл. № 11. – 5 с.
24. Clemens K.W., Toca-Herrera J.L. *Colloid Chemistry* // Eds. C.K. Weiss, J.L. Toca-Herrera. – Basel; Switzerland: MDPI, 2018. – 232 p. DOI: 10.3390/books978-3-03897-460-4.
25. Аввакумова Н.П., Кривопалова М.А., Жернов Ю.В. ИК-спектроскопическое изучение гуматов магния и серебра пелоидов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2010. – Т. 12. – № 1 (8). – С. 2003–2006.

Информация об авторах

Ксения Игоревна Мачехина, кандидат технических наук, доцент отделения химической инженерии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30; machekhinaKsu@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7142-8827>

Елена Николаевна Грязнова, кандидат технических наук, инженер по обеспечению качества в компании общество с ограниченной ответственностью «Рубиус Тех», Россия, 634050, г. Томск, ул. Нахимова, 13/1; elena.gryaznova@rubius.com; <https://orcid.org/0000-0003-0050-4236>

Полина Владимировна Абрамова, кандидат химических наук, доцент отделения химической инженерии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30; bozhkopv@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3563-0179>

Алексей Витальевич Пустовалов, кандидат технических наук, младший научный сотрудник научно-производственной лаборатории «Чистая вода» Инженерной школы новых производственных технологий Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30; pustovalov@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5183-2603>

Юлия Юрьевна Мирошниченко, кандидат химических наук, доцент отделения химической инженерии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30; myu@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0003-4208-0304>

Поступила в редакцию: 29.02.2024

Поступила после рецензирования: 22.04.2024

Принята к публикации: 16.05.2024

REFERENCES

1. Machekhina K.I., Gryaznova E.N., Merinova L.R., Abramova P.V. Sorption purification of model solutions from iron and silicon ions using aluminum oxyhydroxide. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Chemistry*, 2022, vol. 14, no. 1, pp. 79–87. (In Russ.) DOI: 10/14529/chem190202
2. Machekhina K.I., Gryaznova E.N., Abramova P.V. Sorption purification of solutions from silicon ions using aluminum oxyhydroxide modified with manganese and copper ions. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Chemistry*, 2023, vol. 15, no. 1, pp. 75–82. (In Russ.) DOI: 10/14529/chem230108
3. Serikov L.V., Tropina E.A., Shiyan L.N., Frimmel F.H. Iron Oxidation in different types of groundwater of Western Siberia. *J. Soils Sediments*, 2009, vol. 9 (2), pp. 103–110. DOI: 10.1007/s11368-009-0069-x
4. Balobanenko A.A., L'gotin V.A., Dutova E.M., Pokrovsky D.S. Geochemical groundwater peculiarities of Paleogene sediments in S-E Western Siberia artesian basin. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 2016, vol. 43, pp. 012030. DOI: 10.1088/1755-1315/43/1/012030
5. Tawfik A.S., Mujahid M., Mazen K. Developing water treatment technologies in removing heavy metal ions from wastewater: a review. *Environmental Nanotechnology Monitoring and Management*, 2021, vol. 17 (6), pp. 100617. DOI: 10.1016/j.enmm.2021.100617
6. Shiyan L.N., Machekhina K.I., Frantsuzskaya E.O. Groundwater sources in the West Siberian region: Chemical composition, analysis, and water treatment technologies. *Cleaner Engineering and Technology*, 2022, vol. 7, pp. 100441 (1–8). DOI: 10.1016/j.clet.2022.100441
7. Onga L., Boroznjak R., Kornev I., Preis S. Oxidation of aqueous organic molecules in gas-phase pulsed corona discharge affected by sodium dodecyl sulphate: explanation of variability. *Journal of Electrostatics*, 2021, vol. 111, pp. 103581. DOI: 10.1016/j.elstat.2021.103581
8. Zhang H., Lin H., Li O., Cheng C., Shen H., Zhang Z., Wang H. Removal of refractory organics in wastewater by coagulation/flocculation with green chlorine-free coagulants. *Sci. Total Environ*, 2021, vol. 787, pp. 147654. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.147654
9. Tran H.N. Adsorption technology for water and wastewater treatments. *Water*, 2023, vol. 15, pp. 2857. DOI: 10.3390/w15152857
10. Xiangbin Liu. Research progress on treatment technology of produced water by adsorption method. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng*, 2019, vol. 472, pp. 012082. DOI:10.1088/1757-899X/472/1/0120
11. Mitkina V.A., Savelev G.G., Yurmazova T.A., Galanov A.I., Yavorovskiy N.A. Investigation of the mechanism of adsorption of antitumor drugs on iron-carbide nanoparticles. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2010, vol. 317, no. 3, pp. 29–33. (In Russ.)
12. Gryaznova E.N. *Technology for the production of aluminum oxide modified with manganese (II) ions of a nanofiber structure and materials based on it*. Cand. Diss. Tomsk, 2015. 135 p. (In Russ.)
13. Ooi Y., Suka T., Satoh Y., Shibuya K., Ohki I., Masubuchi M., Mikanagi K. Clinical experience of Al₂O₃ ceramics as a surgical implant. *International Orthopedics*, 1982, vol. 6 (2), no. 93–102. DOI: 10.1007/BF00268651
14. Han V.A., Lerner M.I., Myshkin V.F., Ckhe A.A. Development of a reagent-free water purification complex. *Polythematic Online Scientific Journal of Kuban State Agrarian University*, 2013, no. 86 (02), pp. 379–391. (In Russ.)
15. Bakina O.V. *Patterns of transformation of nanopowders of aluminum nitride composition in water solution*. Cand. Diss. Abstract. Tomsk, 2012. 22 p. (In Russ.)
16. Hokkanen S., Bhatnagar A., Sillanpaa M. A review on modification methods to cellulose-based adsorbents to improve adsorption capacity. *Water Research*, 2016, vol. 91, pp. 156–73. DOI: 10.1016/j.watres.2016.01.008
17. Kalia S., Thakur K., Celli A., Kiechel M., Schauer C. Surface modification of plant fibers using environment friendly methods for their application in polymer composites, textile industry and antimicrobial activities: a review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2013, vol. 1 (3), pp. 97–112. DOI: 10.1016/j.jece.2013.04.009
18. Calovi M., Meschini S., Condello M., Rossi S. Innovative code position of a Ag–Al₂O₃ layer: an attractive combination of high durability and lack of cytotoxicity for public space applications. *ACS Omega*, 2022, vol. 7 (29), pp. 25650–25662. DOI: 10.1021/acsomega.2c02872
19. Gordienko M.G., Kon'kova T.V., Menshutina N.V. Influence of composition on the mesoporous structure of the silicagel prepared by sol–gel method. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 2016, vol. 79 (1), pp. 59–66. DOI: 10.1007/s10971-016-4015-2
20. Mikhaylov V.I., Krivoschapkina E.F., Belyy V.A., Isaenko S.I., Zhukov M.V., Gerasimov E.Yu., Krivoschapkin P.V. Magnetic mesoporous catalytic and adsorption active FeAl₂O₃ films. *Microporous and Mesoporous Materials*, 2019, vol. 284, pp. 225–234. DOI: 10.1016/j.micromeso.2019.04.003
21. Hojamberdiev M., Daminova S.S., Kadirova Z.C., Sharipov K.T., Mtalo F., Hasegawa M. Ligand-immobilized spent alumina catalyst for effective removal of heavy metal ions from model contaminated water. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2018, vol. 6(4), pp. 4623–4633. DOI: 10.1016/j.jece.2018.06.070
22. Zolotuhina E.V., Spiridonov B.A., Fedyanin V.I. Water disinfection with nanocomposites based on porous aluminum oxide and silver substances. *Sorption and Chromatographic Processes*, 2010, vol. 10, no. 1, pp. 78–85. (In Russ.)
23. Shiyan L.N., Tropina E.A., Machekhina K.I., Gryaznova E.N., Vlasov V.A. *Method of obtaining a model colloid solution*. Patent RF, no. 2502556, 2013. (In Russ.)
24. Clemens K.W., Toca-Herrera J.L. *Colloid chemistry*. Basel, Switzerland, MDPI, 2018. 232 p. DOI: 10.3390/books978-3-03897-460-4
25. Avvakumova N.P., Krivopalova M.A., Zhernov Yu.V. IR-spectroscopic study of humate magnesium and silver peloids. *Samara Federal Research Scientific Center of the Russian Academy of Sciences (SamSC RAS)*, 2010, vol. 12, no. 1 (8), pp. 2003–2006. (In Russ.)

Information about the authors

Kseniya I. Machekhina, Dr. Sc., Associate Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation; machekhinaKsu@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7142-8827>

Elena N. Gryaznova, Dr. Sc., Engineer, "Rubius Tech", 13/1, Nakhimov avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation; elena.gryaznova@rubius.com; <https://orcid.org/0000-0003-0050-4236>

Polina V. Abramova, Dr. Sc., Associate Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation; bozhkopv@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3563-0179>

Aleksey. V. Pustovalov, Dr. Sc., Junior Researcher, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation; pustovalov@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5183-2603>

Yuliya Yu. Miroshnichenko, Dr. Sc., Associate Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation; myy@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0003-4208-0304>

Received: 29.02.2024

Revised: 22.04.2024

Accepted: 16.05.2024

УДК 666.3.022
DOI: 10.18799/24131830/2024/8/4681
Шифр специальности ВАК: 2.6.14

Эффективная технология изготовления электротехнической керамики из маложелезистых диопсидовых пород

Д.В. Горбачев¹, В.И. Верещагин²✉, Л.О. Роот²

¹ Научно-технологический центр «Быстрая керамика», Россия, г. Липецк

² Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск

✉ vver@tpu.ru

Аннотация. Актуальность. Использование природного диопсида $\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$ в производстве керамических диэлектриков реализовано на двух предприятиях Челябинской области в 1985 г. на основе комплексных исследований диопсидовых пород Южного Прибайкалья коллективом кафедры технологии силикатов Томского политехнического университета. Природный диопсид использовался в качестве добавки в шихту электротехнического фарфора. Кроме этого, изготавливались керамические диэлектрики с диопсидовой кристаллической фазой для службы при частотах 10^6 Гц. В настоящее время потребность в керамических диэлектриках в России покрывается за счет импорта. Разработка новых технологий керамических диэлектриков из отечественного сырья является актуальной. **Целью** данного исследования является разработка эффективной технологии керамических диэлектриков с диопсидовой кристаллической фазой из природных маложелезистых диопсидов, включающей получение компактов необожженных изделий литьем водных суспензий композиций непластичных компонентов. **Объектом** исследования является технология керамических диэлектриков с диопсидовой кристаллической фазой, включающая обжиг компактов, сформованных из водных суспензий композиций диопсидового концентрата с перлитом в качестве плавня. **Методы.** Суспензию получали измельчением компонентов в водной среде в шаровой мельнице уралитовыми шарами при влажности 20 ± 2 %. Прочность при сжатии и изгибе, электрическая прочность, диэлектрическая проницаемость образцов определялись по ГОСТ 24409-80, водопоглощение – по ГОСТ 26093-84. Рентгенофазовый анализ проводился на дифрактометре ДРОН-ЗМ (Буревестник, Россия), анализ структуры – на электронном микроскопе JSM 6000 (Jeol, Япония). **Результаты.** Особенностью предложенной технологии является использование для приготовления суспензии только непластичных компонентов и исключение глинистых компонентов, что позволяет уменьшить влажность отливок и стабилизировать процессы формирования структуры керамики при обжиге. Получен керамический диэлектрик с содержанием диопсида 70 ± 2 мас. % обжигом изделий при $1130\text{--}1150$ °С, сформованных литьем водных суспензий. Прочность при изгибе составила 85–90 МПа при электрической прочности 35–38 кВ/мм².

Ключевые слова: диопсид, перлит, непластичные компоненты, суспензия, керамический диэлектрик

Для цитирования: Горбачев Д.В., Верещагин В.И., Роот Л.О. Эффективная технология изготовления электротехнической керамики из маложелезистых диопсидовых пород // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 8. – С. 29–36. DOI: 10.18799/24131830/2024/8/4681

UDC 666.3.022
DOI: 10.18799/24131830/2024/8/4681

Efficient technology for manufacturing electrical ceramics from low-iron diopside rocks

D.V. Gorbachev¹, V.I. Vereshchagin²✉, L.O. Root²

¹ Science and technology center “Fast Ceramics”, Lipetsk, Russian Federation

² National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

✉ vver@tpu.ru

Abstract. Relevance. The use of natural diopside $\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$ in the production of ceramic dielectrics was implemented at two enterprises in the Chelyabinsk region in 1985 on the basis of comprehensive studies of diopside rocks of the Southern Baikal region by the team of the Department of Silicate Technology of Tomsk Polytechnic University. Natural diopside was used as an additive to the charge of electrical porcelain. In addition, ceramic dielectrics with a diopside crystalline phase were manufactured for exploitation at the frequencies of 10^6 Hz. Currently, the need for ceramic dielectrics in Russia is covered by imports. Though, the development of new technologies for ceramic dielectrics from domestic raw materials is relevant. **Aim.** To develop an efficient technology for ceramic dielectrics with a diopside crystalline phase from natural low-iron diopside rocks. This technology includes the production of compacts of unfired products by moulding aqueous suspensions of compositions of nonplastic components. **Object.** The technology of ceramic dielectrics with a diopside crystalline phase, including the firing of compacts formed from aqueous suspensions of diopside concentrate compositions with perlite as flux. **Methods.** The suspension was obtained by grinding the components in an aqueous environment in a ball mill with uralite balls at humidity of $20 \pm 2\%$. Compressive and bending strength, electrical strength, dielectric constant of the samples were determined according to the SS 24409-80, water absorption was measured according to the SS 26093-84. X-ray phase analysis was carried out on a DRON-3M diffractometer (Burevestnik, Russia), structure analysis was implemented on a JSM 6000 electron microscope (Jeol, Japan). **Results.** A distinctive feature of the proposed technology is the use of nonplastic components only to prepare the suspension and the exclusion of clay components. This makes it possible to reduce the humidity of the castings and stabilize the formation of the ceramic structure during firing. The authors have obtained ceramic dielectric with a diopside content of 70 ± 2 wt % by firing products molded at $1130\text{--}1150^\circ\text{C}$. The bending strength reached $85\text{--}90$ MPa with an electrical strength of $35\text{--}38$ kV/mm².

Keywords: diopside, perlite, nonplastic components, suspension, ceramic dielectric

For citation: Gorbachev D.V., Vereshchagin V.I., Root L.O. Efficient technology for manufacturing electrical ceramics from low-iron diopside rocks. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 8, pp. 29–36. DOI: 10.18799/24131830/2024/8/4681

Введение

Результаты геологических (институт земной коры СО РАН) и технологических (Томский политехнический университет) исследований стали основой оценки маложелезистых диопсидовых пород Южного Прибайкалья в качестве сырья для производства различных керамических материалов, включая керамические диэлектрики [1, 2]. Результаты этих исследований стали основанием утверждения запасов Бурутуйского месторождения диопсида (Иркутская область) и открытия карьера для добычи диопсидовых пород. Использование природного диопсида в качестве компонента шихты керамической плитки для внутренней и наружной облицовки зданий, санитарно-технического фаянса, всех видов фарфора обеспечивает значительное улучшение качества изделий по прочности и стойкости к термоударам при снижении температуры обжига [3–17].

Диопсид ($\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$) – кальций-магний-пироксен, по диэлектрическим свойствам аналогичен силикатам магния (табл. 1), что определяет возможность изготавливать керамические диэлектрики с диопсидом в качестве кристаллической фазы с использованием природных диопсидсодержащих компонентов. Температура плавления диопсида 1390°C , что значительно ниже температуры плавления магниевого пироксена MgSiO_3 (1557°C).

Добавка 12 ± 2 мас. % диопсидового концентрата в шихту электрофарфора традиционного состава приводит к улучшению характеристик изделий по механической и электрической прочности за счет дополнительного синтеза анортита ($\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) и

кордиерита ($2\text{MgO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{SiO}_2$) при взаимодействии диопсида с глинистыми компонентами. При этом основной кристаллической фазой электрофарфора остается муллит – $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ [18].

С диопсидовой кристаллической фазой была разработана и изготовлена керамика по спековой технологии для работы при высоких частотах (1 МГц) в качестве аналога стеатитовой керамики с протозенстатитовой модификацией метасиликата магния – MgSiO_3 [19].

Гранулированная масса для получения спека обжигом включает диопсидовый концентрат, углекислый барий и небольшое количество (5,0 % мас.) пластичной беложгущейся глины. Спековая технология керамических изделий является энергозатратной и применяется ограниченно для изготовления диэлектриков в электронной технике [19].

Целью исследования является разработка энергоэффективной технологии керамических диэлектриков с диопсидовой кристаллической фазой массового применения.

Материалы и методы

Учитывая результаты выполненных работ по керамике с диопсидовой кристаллической фазой, в качестве основного компонента керамики был выбран концентрат диопсида Бурутуйского месторождения, а в качестве плавня – перлит Арагацкого месторождения. В качестве добавки, увеличивающей вязкость расплава, использован карбонат бария. Химический состав исходных компонентов представлен в табл. 2.

Таблица 1. Свойства магнезиальных силикатов

Table 1. Properties of magnesium silicates

Название/ Формула Name/ Formula	Модификации Modifications	Плотность, ρ, кг/м³ Density, ρ, kg/m³	Температура плавления, °C Fusing temperature, °C	Коэффициент линейного теплового расширения, α·10 ⁻⁶ , K ⁻¹ Coefficient of linear thermal expansion α·10 ⁻⁶ , K ⁻¹	Удельное объемное электро-сопротивление, ρ, Ом/м Specific volumetric electrical resistance, ρ, Ohm/m	Относительная диэлектрическая проницаемость, ε Relative electric permittivity, ε	Источник Reference
Форстерит Forsterite Mg ₂ SiO ₄	Нет No	3220	1890	12,0	10 ⁻¹⁶ –10 ⁻¹⁷ (20 °C)	7	[13, 15, 16, 19]
Энстатит Enstatite MgSiO ₃	Энстатит Enstatite	3220	1557	12,0	10 ⁻¹⁶ –10 ⁻¹⁷ (20 °C)	7	
	Клиноэнстатит Clinoenstatite	3190		10,5			
	Протоэнстатит Protoenstatite	3100		8,1			
Диопсид Diopside CaMgSi ₂ O ₆	Нет No	3250	1390		10 ⁻¹⁶ –10 ⁻¹⁷ (20 °C)	7	

Таблица 2. Химический состав исходных компонентов

Table 2. Chemical composition of the initial components

Компонент Component	Содержание оксидов, мас. % Content of oxides, wt %									
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	TiO ₂	K ₂ O	Na ₂ O	BaO	Потери при прокаливании Ignition loss
Диопсидовый концентрат Diopside concentrate	53,41	0,20	0,10	26,21	17,88	0,01	0,04	0,19	–	1,6
Перлит Арагацкий Perlite of Aragats	73,31	13,32	0,73	1,71	0,20	0,15	3,62	3,74	–	4,45
Барий углекислый Barium carbonate	–	–	–	–	–	–	–	–	77,3	22,7

Суспензию получали измельчением компонентов в водной среде в шаровой мельнице уралитовыми шарами до остатка на сите № 0063 0,5 % при влажности 20±2 % [20]. Прочность при сжатии и изгибе, электрическая прочность, диэлектрическая проницаемость образцов определялись по ГОСТ 24409-80, водопоглощение – по ГОСТ 26093-84. Рентгенофазовый анализ проводился на дифрактометре ДРОН-3М (Буревестник, Россия), анализ структуры – на электронном микроскопе JSM 6000 (Jeol, Япония). Анализ изображений пор керамики проведен с применением универсального программного обеспечения ImageJ-FiJi (модуль «Analyze Particles»).

Результаты и обсуждение

Первоначально исследовалась композиция диопсидового концентрата (70 мас. %) с перлитом в качестве плавня (30 мас. %). Перлит обеспечивает спекание керамического материала за счет расплава. Основными оксидами в перлите являются оксиды кремния, алюминия и щелочных металлов (табл. 2). Предварительно проведен анализ кривых плавкостей в системах R₂O-Al₂O₃-SiO₂, где R пред-

ставлено К и Na, для чего химический состав перлита приведен к трехкомпонентным системам (табл. 3). Расчет кривых плавкостей проводился с использованием диаграмм состояния систем [21] (рис. 1).

Таблица 3. Химический состав перлита, приведенный к системам R₂O-Al₂O₃-SiO₂

Table 3. Chemical composition of perlite modified to R₂O-Al₂O₃-SiO₂ systems

Модельная система оксидов Modular oxide system	Содержание оксидов, мас. % Content of oxides, wt %			
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O
Na ₂ O-Al ₂ O ₃ -SiO ₂	78,42	15,03	6,55	–
K ₂ O-Al ₂ O ₃ -SiO ₂	78,83	15,11	–	6,06

Для жидкостного спекания керамики необходимо образование при обжиге 30±5 мас. % расплава. В соответствии с вероятной кривой плавкости (рис. 1, кривая 3) при 1100 °C может образоваться 25,5 % расплава, а при 1150 °C – около 27 %, что достаточно для спекания керамического материала.

Это дает основание предположить, что спекание композиции будет завершаться в интервале температур 1100–1150 °С. На рис. 2 представлены зависимости водопоглощения, усадки и прочности керамических образцов от температуры обжига в интервале 900–1200 °С.

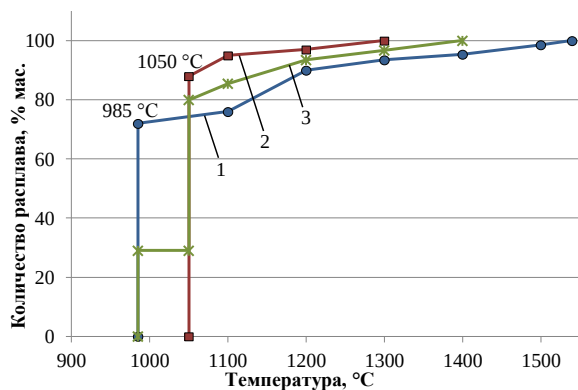


Рис. 1. Равновесные кривые плавкости перлита при пересчете его состава на трехкомпонентные системы: 1 – $K_2O-Al_2O_3-SiO_2$; 2 – $Na_2O-Al_2O_3-SiO_2$; 3 – вероятная кривая плавкости с учетом содержания оксидов калия и натрия

Fig. 1. Equilibrium melting curves of perlite when recalculating compositions for three-component systems: 1 – $K_2O-Al_2O_3-SiO_2$; 2 – $Na_2O-Al_2O_3-SiO_2$; 3 – expectable melting curve as applied to potassium and sodium oxides content

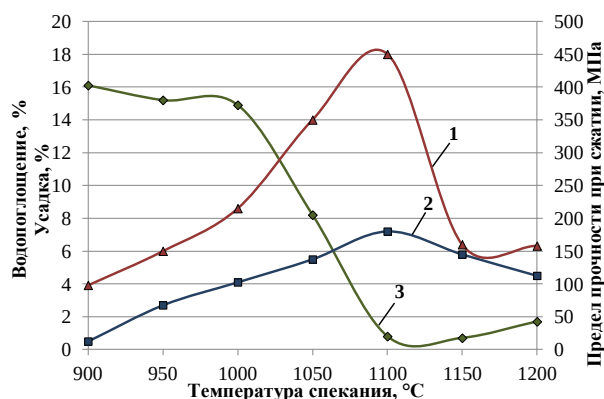


Рис. 2. Зависимости свойств керамического материала на основе композиции: диопсидовый концентрат (70 %), перлит (30 %) от температуры обжига: 1 – предел прочности при сжатии; 2 – усадка; 3 – водопоглощение

Fig. 2. Dependences of the properties of the ceramic material based on the composition: diopside concentrate (70%), perlite (30%) on the firing temperature: 1 – compressive strength; 2 – shrinkage; 3 – water absorption

Анализ зависимостей рис. 2 показывает, что максимальная прочность и усадка, минимальное

водопоглощение имеют образцы керамики после обжига при 1100 °С. После обжига керамики при температурах 1150–1200 °С прочность и усадка уменьшаются, а водопоглощение растет, что связано с увеличением объема и размеров закрытых пор за счет повышения давления в порах при росте температуры выше 1100 °С. Поры видны на микрофотографии керамики после обжига при 1150 °С (рис. 3).

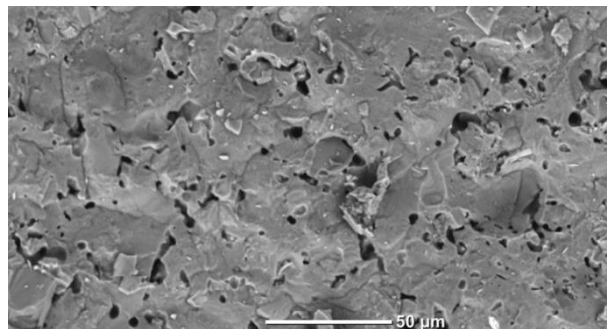


Рис. 3. Микрофотография структуры керамики на основе композиции диопсидового концентрата с перлитом после обжига при 1150 °С

Fig. 3. Microphotography of the ceramic structure based on the composition of diopside concentrate with perlite after firing at 1150 °C

Анализ пористой структуры керамики показывает, что пористость составляет 14,0 %. Более 80 % пор имеют размер в диапазоне 0,1–5,0 мкм. Крупных пор размерами от 10 до 15 мкм менее 4 %. Количество пор размерами в диапазоне 5–10 мкм 12 % (рис. 4).

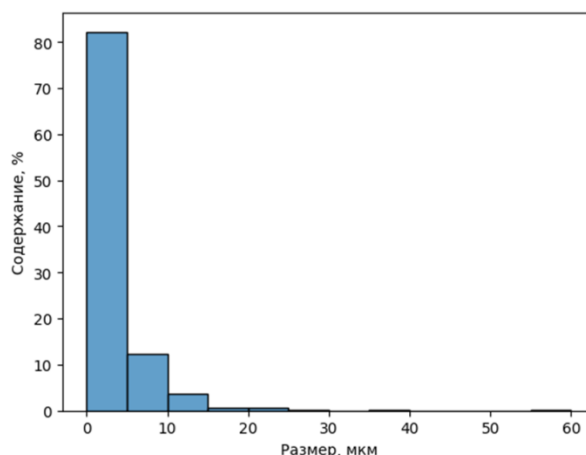


Рис. 4. Распределение пор в структуре керамики на основе композиции диопсидового концентрата с перлитом после обжига при 1150 °С

Fig. 4. Pore distribution in the ceramic structure based on the composition of diopside concentrate with perlite after firing at 1150 °C

До температуры 1100 °С при обжиге керамики поры открытые, поэтому усадка и прочность возрастают, а водопоглощение снижается. Уменьшение размеров закрытых пор возможно при увеличении вязкости расплава, обеспечивающего спекание керамического материала. Для увеличения вязкости силикатных расплавов используют оксиды кремния, бария и силикат циркония [19, 22]. Исследования композиций с различным количеством оксида бария определили его достаточное количество (3,5 мас. %), необходимое для спекания керамики без увеличения размера закрытых пор керамического материала. На рис. 5 представлены зависимости свойств керамики с ВаО от температуры обжига.

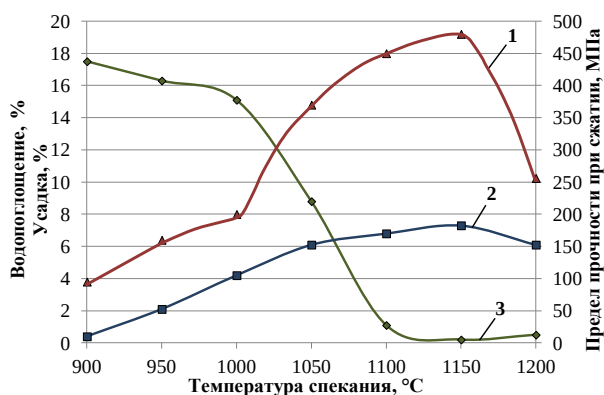


Рис. 5. Зависимости свойств керамического материала на основе композиции из диопсидового концентрата (70 %), перлита (26,5 %), оксида бария (3,5 %) от температуры обжига: 1 – предел прочности при сжатии; 2 – усадка; 3 – водопоглощение

Fig. 5. Dependences of the properties of ceramic material based on the composition of diopside concentrate (70%), perlite (26,5%), barium oxide (3,5%) on the firing temperature: 1 – compressive strength; 2 – shrinkage; 3 – water absorption

Таблица 4. Зависимость температуры спекания диопсидовой керамики от количества расплава (стеклофазы) с добавкой оксида бария

Table 4. Dependence of the sintering temperature of diopside ceramics on the amount of fusion (glass phase) with the addition of barium oxide

Температура спекания, °С Sintering temperature, °С	Фазовый состав керамики Phase composition of ceramics		Количество компонентов стеклофазы Amount of the glass phase components	
	мас. %/wt %			
	Диопсид Diopside	Стеклофаза Glass phase	Перлит Perlite	Оксид бария Barium oxide
1100	70,0	30,0	30,0	0,0
1150	70,5	29,5	26,0	3,5
1150	72,0	28,0	24,5	3,5
1170	73,0	27,0	23,5	3,5
1170	75,0	25,0	21,5	3,5

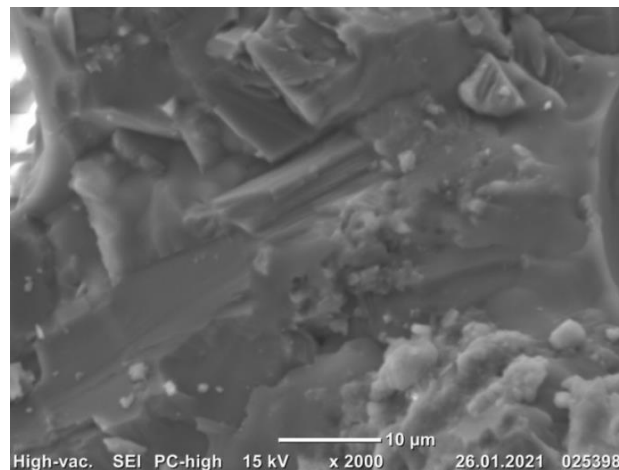


Рис. 6. Микрофотография структуры диопсидовой керамики с добавкой ВаО (3,5 мас. %) после обжига при 1150 °С

Fig. 6. Microphotography of the structure of diopside ceramics with BaO additive (3,5 wt %) after firing at 1150 °C

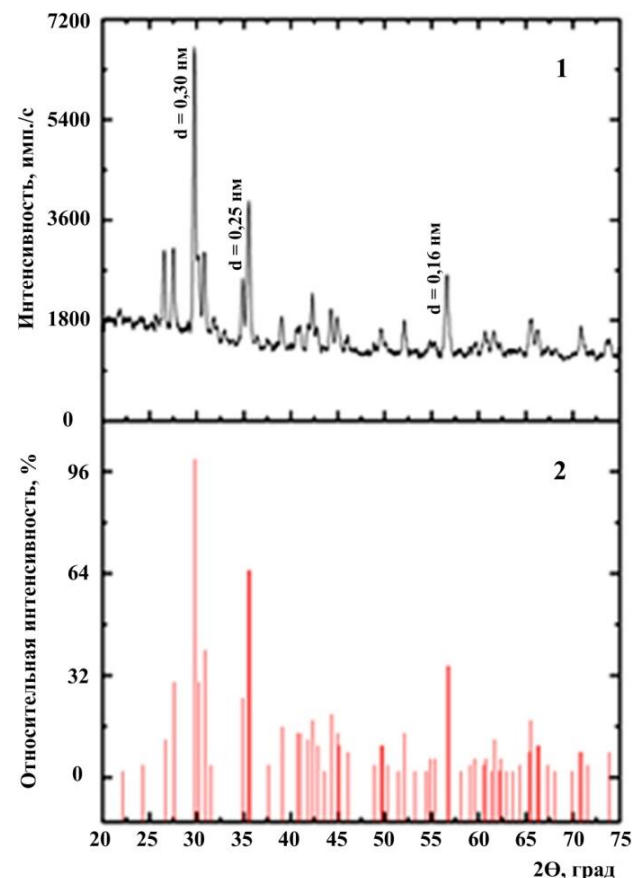


Рис. 7. Рентгенограмма керамики с диопсидовой кристаллической фазой (1), эталонная штрих-диаграмма рентгеновской дифракции диопсида – Ca·Mg·Si₂O₆ (2)

Fig. 7. X-ray diffraction data of ceramics with a diopside crystal phase (1), reference line-diagram of X-ray diffraction of diopside – Ca·Mg·Si₂O₆ (2)

Из анализа зависимостей рис. 5 следует, что усадка керамики растет до температуры 1150 °С, фиксируется высокая прочность после обжига при температурах 1100–1150 °С, водопоглощение близкое к нулевому после обжига при 1130–1150 °С. Результаты по температурам спекания в зависимости от количества расплава при содержании ВаО 3,5 мас. % приведены в табл. 4. При содержании расплава 30 мас. % нулевое водопоглощение достигается при 1150 °С, а при 25 мас. % – при 1170 °С.

Таблица 5. Характеристики электротехнической керамики, обожженной при 1150 °С, из композиции диопсидового концентрата с перлитом и добавкой оксида бария

Table 5. Characteristics of electrical ceramics fired at 1150°C, from a composition of diopside concentrate with perlite and the addition of barium oxide

Характеристики Characteristics	Диопсидовая электрокерамика Diopside insulation ceramics	Электрофарфор ГОСТ 20419-83 Insulation porcelain SS 20419-83
Водопоглощение Water absorption, %	0,01	< 0,01
Предел прочности при сжатии, МПа Compression resistance, MPa	450–460	–
Предел прочности при изгибе, МПа Flexural strength, MPa	85–90	60
Электрическая прочность при частоте 50 Гц, кВ/мм Dielectric resistance at a frequency of 50 Hz, kV/mm	35–38	25
Диэлектрическая проницаемость Dielectric capacity, ε	6,5	6–7

На микрофотографии керамического материала с добавкой ВаО (рис. 6) зафиксированы отдельные поры размерами не более 2 мкм и удлинено-

призматические кристаллы. Согласно результатам рентгенофазового анализа (рис. 7) кристаллической фазой керамики является диопсид.

Свойства электротехнической керамики с диопсидовой кристаллической фазой, полученной с использованием водных суспензий при формовании изделий, представлены в табл. 5. Фазовый состав керамики: кристаллическая фаза диопсида ($\text{Ca} \cdot \text{Mg} \cdot \text{Si}_2\text{O}_6$) – 70,0 мас. %, стекловидная фаза – 30,0 мас. % (перлит – 26,5 %, ВаО – 3,5 %).

По прочностным и диэлектрическим характеристикам (табл. 5) электротехническая керамика с диопсидовой кристаллической фазой превышает требования ГОСТ на электротехнический фарфор. Электротехнический фарфор на основе каолина с добавкой диопсида (12 мас. %) спекается при 1220 °С [18].

Заключение

Отличительной особенностью предложенной технологии электротехнической керамики на основе диопсида является использование непластичных компонентов при полном отсутствии глинистых, что позволяет измельчать компоненты совместно и отдельно при меньшей влажности суспензий 20±2 % по сравнению с влажностью суспензий с глинистыми компонентами (30–40 %). При этом технология позволяет менять состав и количество стекловидной фазы при постоянном составе кристаллической фазы. Диэлектрические и прочностные свойства керамики, обожженной при 1150 °С, превышают требования ГОСТ 20419-83 на электротехнический фарфор.

Эффективность технологии заключается в исключении операций обезвоживания суспензий с глинистым компонентом на фильтр-прессах до пластичной влажности (25 %), усреднения влажности при вакуумировании пластичной массы и формования изделий из подготовленной пластичной массы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Безжелезистые диопсидовые породы – новый вид минерального сырья / В.И. Верещагин, Л.З. Резницкий, В.М. Вишняков, Е.П. Васильев, Ю.И. Алексеев // Доклады Академии наук СССР. – 1988. – Т. 303. – № 6. – С. 1434–1437.
2. Диопсидовые породы – универсальное сырьё для производства керамических и других силикатных материалов / В.И. Верещагин, Ю.И. Алексеев, В.М. Погребенков, Л.З. Резницкий, Е.П. Васильев, Е.А. Некрасова // Керамическая промышленность. Сер. 5. Аналитический обзор. – Вып. 2. – М.: ВНИИЭСМ, 1990. – 60 с.
3. Меньшикова В.К. Влияние грубодисперсных компонентов на свойства керамического материала // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2020. – № 10. – С. 8–16.
4. Smedskjaer M.M., Jensen M., Yue Y.-Z. Theoretical calculation and measurement of the hardness of diopside // Journal of the American Ceramic Society. – 2008. – Vol. 91. – P. 514–518. DOI: 10.1111/j.1551-2916.2007.02166.x
5. The anorthite–diopside system: structural and devitrification study. P. II: Crystallinity analysis by the Rietveld–RIR method / L. Barbieri, F. Bondioli, I. Lancellotti, C. Leonelli, M. Montorsi, A.M. Ferrari, P. Miselli // Journal of the American Ceramic Society. – 2005. – Vol. 88. – P. 3131–3136. DOI: 10.1111/j.1551-2916.2005.00578.x
6. Crystallization behavior and mechanical properties of mica–diopside based glass-ceramics from granite wastes with different SiO_2/MgO ratio / W. Xingtao, T. Xiaokun, P. Xiaojin, S. Chuanxiang, Q. Ya, Y. Yunlong, K. Junfeng // Journal of Non-Crystalline Solids. – 2023. – Vol. 605. – P. 122185. DOI: 10.1016/j.jnoncrysol.2023.122185.
7. Diopside glass-ceramics were fabricated by sintering the powder mixtures of waste glass and kaolin / J. Feng, D. Wu, M. Long, K. Lei, Y. Sun, X. Zhao // Ceramics International. – 2022. – Vol. 48. – Iss. 18. – P. 27088–27096. DOI: 10.1016/j.ceramint.2022.06.020.

8. Abdel-Hameed S.A.M., El-kheshen A.A. Thermal and chemical properties of diopside-wollastonite glass-ceramics in the $\text{SiO}_2\text{--CaO--MgO}$ system from raw materials // *Ceramics International*. – 2003. – Vol. 29. – Iss. 3. – P. 265–269. DOI: 10.1016/S0272-8842(02)00114-1.
9. Choi B.K., Kim E.S. Effects of crystallization behavior on microwave dielectric properties of $\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$ glass-ceramics // *Journal of Korean Ceramic Society*. – 2013. – Vol. 50. – Iss. 1. – P. 70–74. DOI: 10.4191/kcers.2013.50.1.70.
10. Diopside rocks – raw materials for many purposes / V.I. Vereshchagin, L.Z. Reznitsky, E.P. Vasilev, Yu.I. Alekseev // *Glass and Ceramics*. – 1989. – Vol. 46. – Iss. 2. – P. 32–33.
11. Glasses and glass-ceramics in the CaO--MgO--SiO_2 system: diopside containing compositions – a brief review / D.U. Tulyaganov, K. Dimitriadis, S. Agathopoulos, H.R. Fernandes // *Journal of Non-Crystalline Solids*. – 2023. – Vol. 612. – P. 122351. DOI: 10.1016/j.jnoncrysol.2023.122351.
12. Karamanov A., Pelino M. Induced crystallization porosity and properties of sintered diopside and wollastonite glass-ceramics // *Journal of the European Ceramic Society*. – 2008. – Vol. 28. – Iss. 3. – P. 555–562. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2007.08.001.
13. Козару Т.В. Форстеритовая керамика на основе природных кальциймагниевого силикатов // Конструкции из композиционных материалов. Межотраслевой научно-технический журнал. – 2006. – № 4. – С. 109–110.
14. Mielcarek W., Nowak- Woźny D., Prociów K. Correlation between MgSiO_3 phases and mechanical durability of steatite ceramics // *Journal of the European Ceramic Society*. – 2004. – Iss. 24. – P. 3817–3821.
15. Аветиков В.Г., Зинько Э.И. Магнезиальная электротехническая керамика: монография. – М.: Энергия, 1973. – 185 с.
16. Выдрик Г.А., Костюков Н.С. Физико- химические основы производства и эксплуатации электрокерамики. – М.: Энергия, 1971. – 328 с.
17. Меньшикова В.К., Демина Л.Н. Непластичные сырьевые материалы для производства строительной керамики // Строительные материалы и изделия. – 2020. – Т. 3. – № 4. – С. 31–38. DOI: 10.34031/2618-7183-2020-3-4-31-38
18. Верещагин В.И., Могилевская Н.В., Горбачев Д.В. Электротехнический фарфор низкотемпературного обжига с добавками диопсида. // *Стекло и керамика*. – 2021 – № 12. – С. 21–27.
19. Diopside based high-frequency ceramics / Yu.I. Alekseev, E.P. Vasilev, V.I. Vereshchagin, L.Z. Reznitsky, P.I. Shatalov // *Glass and Ceramics*. – 1988. – Vol. 44. – Iss. 8. – P. 359–362.
20. Способ приготовления суспензии для литья керамических изделий: пат. № 2751616, Российская Федерация, С1; заявл. 28.08.2020; опубл. 15.07.2021, Бюл. № 20. – 15 с.
21. Диаграммы состояния силикатных систем. Справочник. Выпуск третий. Тройные силикатные системы / Н.А. Торопов, В.П. Барзаковский, В.В. Лапин, Н.Н. Курцева, А.И. Бойкова. – Л.: Наука. 1972. – С. 151–168.
22. Effect of BaO addition on crystallization, microstructure, and properties of diopside- Ca--Tschermak clinopyroxene-based glass-ceramics / A. Goel, D.U. Tulyaganov, V.V. Kharton, A.A. Yaremchenko, S. Agathopoulos, J.M.F. Ferreira // *Journal of the American Ceramic Society*. – 2007. – Iss. 90. – P. 2236–2244. DOI: 10.1111/j.1551-2916.2007.01743.x

Информация об авторах

Дмитрий Валерьевич Горбачев, директор Научно-технологического центра «Быстрая керамика», Россия, 398017, г. Липецк, ул. 9-го Мая, стр. 27и, пом. 1. dv66-52@mail.ru

Владимир Иванович Верещагин, доктор технических наук, профессор-консультант научно-образовательного центра Н.М. Кижнера Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. vver@tpu.ru

Людмила Олеговна Роот, кандидат технических наук, доцент отделения химической инженерии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. tolbanowa@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6898-5999>

Поступила в редакцию: 03.05.2024

Поступила после рецензирования: 13.05.2024

Принята к публикации: 16.05.2024

REFERENCES

1. Vereshchagin V.I., Reznitsky L.Z., Vishnyakov V.M., Vasilev E.P., Alekseev Yu.I. Iron-free diopside rocks – a new type of mineral raw materials. *Reports of the Academy of Sciences of the USSR*, 1988, vol. 303, no. 6, pp. 1434–1437. (In Russ.)
2. Vereshchagin V.I., Alekseev Yu.I., Pogrebenkov V.M., Reznitsky L.Z., Vasilev E.P., Nekrasova E.A. Diopside rocks – universal raw materials for production of ceramic and other silicate materials. *Ceramic industry. Series 5. Analytical review*. Vol. 2. Moscow, All-Union Scientific Research Institute of Scientific and Technical Information and Construction Materials Industry Publ., 1991, 60 p. (In Russ.)
3. Menshikova V.K. Influence of coarse-dispersed components on the properties of ceramic material. *Bulletin of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*, 2020, no. 10, pp. 8–16. (In Russ.)
4. Smedskjaer M.M., Jensen M., Yue Y.-Z. Theoretical calculation and measurement of the hardness of diopside. *Journal of the American Ceramic Society*, 2008, vol. 91, pp. 514–518. DOI: 10.1111/j.1551-2916.2007.02166.x
5. Barbieri L., Bondioli F., Lancellotti I., Leonelli C., Montorsi M., Ferrari A.M., Miselli P. The anorthite–diopside system: structural and devitrification study. P. II: Crystallinity analysis by the Rietveld–RIR method. *Journal of the American Ceramic Society*, 2005, vol. 88, pp. 3131–3136. DOI: 10.1111/j.1551-2916.2005.00578.x

6. Xingtao W., Xiaokun T., Xiaojin P., Chuanxiang S., Ya Q., Yunlong Y., Junfeng K. Crystallization behavior and mechanical properties of mica-diopside based glass-ceramics from granite wastes with different SiO₂/MgO ratio. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2023, vol. 605, pp. 122185. DOI: 10.1016/j.jnoncrysol.2023.122185.
7. Feng J., Wu D., Long M., Lei K., Sun Y., Zhao X. Diopside glass-ceramics were fabricated by sintering the powder mixtures of waste glass and kaolin. *Ceramics International*, 2022, vol. 48, Iss. 18, pp. 27088–27096. DOI: 10.1016/j.ceramint.2022.06.020.
8. Abdel-Hameed S.A.M., El-kheshen A.A. Thermal and chemical properties of diopside-wollastonite glass-ceramics in the SiO₂–CaO–MgO system from raw materials. *Ceramics International*, 2003, vol. 29, Iss. 3, pp. 265–269. DOI: 10.1016/S0272-8842(02)00114-1.
9. Choi B.K., Kim E.S. Effects of crystallization behavior on microwave dielectric properties of CaMgSi₂O₆ glass-ceramics. *Journal of Korean Ceramic Society*, 2013, vol. 50, Iss. 1, pp. 70–74. DOI: 10.4191/kcers.2013.50.1.70.
10. Vereshchagin V.I., Reznitsky L.Z., Vasilev E.P., Alekseev Yu.I. Diopside rocks – raw materials for many purposes. *Glass and Ceramics*, 1989, vol. 46, Iss. 2, pp. 32–33.
11. Tulyaganov D.U., Dimitriadis K., Agathopoulos S., Fernandes H.R. Glasses and glass-ceramics in the CaO–MgO–SiO₂ system: Diopside containing compositions – A brief review. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2023, vol. 612, pp. 122351. DOI: 10.1016/j.jnoncrysol.2023.122351.
12. Karamanov A., Pelino M. Induced crystallization porosity and properties of sintered diopside and wollastonite glass-ceramics. *Journal of the European Ceramic Society*, 2008, vol. 28, Iss. 3, pp. 555–562. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2007.08.001.
13. Kozaru T.V. Forsterite ceramics based on natural calcium magnesium silicates. *Constructions from composite materials. Intersectoral scientific and technical journal*, 2006, no. 4, pp. 109–110. (In Russ.)
14. Mielcarek W., Nowak- Woźny D., Prociów K. Correlation between MgSiO₃ phases and mechanical durability of steatite ceramics. *Journal of the European Ceramic Society*, 2004, Iss. 24, pp. 3817–3821.
15. Avetikov V.G., Zinko E.I. *Magnesian electrotechnical ceramics: monograph*. Moscow, Energiya Publ., 1973. 185 p. (In Russ.)
16. Vydrick G.A., Kostyukov N.S. *Physico-chemical bases of production and operation of electro ceramics*. Moscow, Energiya Publ., 1971. 328 p. (In Russ.)
17. Menshikova V.K., Demina L.N. Non-plastic raw materials for the production of building ceramics. *Building materials and products*, 2020, vol. 3, no. 4, pp. 31–38. (In Russ.) DOI: 10.34031/2618-7183-2020-3-4-31-38
18. Vereshchagin V.I., Mogilevskaya N.V., Gorbachev D.V. Electrotechnical porcelain of low-temperature firing with diopside additives. *Glass and ceramics*, 2021, no. 12, pp. 21–27. (In Russ.)
19. Alekseev Yu.I., Vasilev E.P., Vereshchagin V.I., Reznitsky L.Z., Shatalov P.I. Diopside based high-frequency ceramics. *Glass and Ceramics*, 1988, vol. 44, Iss. 8, pp. 359–362.
20. Vereshchagin V.I., Gorbachev D.V. *Method of preparation of suspension for casting ceramic products*. Patent RF, no. 2751616, 2021. (In Russ.)
21. Toropov N.A., Barzakovsky V.P., Lapin V.V., Kurtseva N.N., Boikova A.I. *Diagrams of the state of silicate systems. Guide. Issue three. Triple silicate systems*. Leningrad, Nauka Publ., 1972. pp. 151–168. (In Russ.)
22. Goel A., Tulyaganov D.U., Kharton V.V., Yaremchenko A.A., Agathopoulos S., Ferreira J.M.F. Effect of BaO Addition on crystallization, microstructure, and properties of diopside–Ca–Tschermak clinopyroxene-based glass-ceramics. *Journal of the American Ceramic Society*, 2007, Iss. 90, pp. 2236–2244. DOI: 10.1111/j.1551-2916.2007.01743.x

Information about the authors

Dmitry V. Gorbachev, Scientific and Technological Center "Fast ceramics", bld. 27i, room 1, 9 Maya street, Lipetsk, 398017, Russian Federation. dv66-52@mail.ru

Vladimir I. Vereshchagin, Dr. Sc., Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. vver@tpu.ru

Liudmila O. Root, Cand. Sc., Associate Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. tolbanowa@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6898-5999>

Received: 03.05.2024

Revised: 13.05.2024

Accepted: 16.05.2024

УДК 553.411+551.311.231
DOI: 10.18799/24131830/2024/8/4659
Шифр специальности ВАК: 1.6.10

Геохимические критерии золотоносности кор выветривания Томь-Яйского междуречья

В.Г. Ворошилов, Т.В. Тимкин✉, О.В. Савинова, Д.К. Молукпаева

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск

✉timkin@tpu.ru

Аннотация. Актуальность. Золотоносные коры выветривания широко распространены в Томь-Яйском междуречье, но критерии прогнозирования их золотоносности, в том числе геохимические, в должной мере не разработаны. **Цель:** выявить геохимические особенности кор выветривания Томь-Яйского междуречья для решения вопросов прогнозирования их золотоносности. **Объект:** коры выветривания по породам палеозойского фундамента Томь-Яйского междуречья. **Методы.** Химический состав продуктов выветривания определялся методом ИСП-масс-спектрометрии. Выполнен анализ керновых проб 36 скважин на 20 элементов. Обработка полученных результатов осуществлялась в программном комплексе для статистического анализа Statistica. Рассчитаны основные параметры распределения химических элементов в профилях золотоносной и незолотоносной кор выветривания, проведены дискриминантный и факторный анализы. **Результаты.** Установлены статистически значимые различия в химическом составе зон профиля выветривания. В процессе выветривания незолотоносных пород происходит вынос Р, Мп, Со, Ni, Zn и накопление Cr, Мо, Ag, Sn, Sb, Hf, Tl, Pb, Bi при индифферентном поведении Au, As, Fe, Cu. Золотоносные коры выветривания формируются по минерализованным зонам и изначально обогащены Au, As, W, Sb, в меньшей мере – Cu, Zn, Pb, Bi, Tl, Hf, Sn. Среднее содержание золота и большинства элементов-спутников (кроме Pb) в процессе выветривания минерализованных зон снижается, но дисперсия многократно возрастает, вследствие чего в пределах зон гидролиза и гидратации возникают участки вторичного обогащения золотом и элементами-спутниками Sb, As, Ag, Sn, Tl, Co, Cu, Zn, Cd, Bi. Геохимические ассоциации, характерные для остаточных кор выветривания, в значительной степени сохраняются и в переотложенных корах, где совместно с золотом накапливаются As, Sb, W, Cd, Ag, Sn, Hf.

Ключевые слова: золото, остаточная кора выветривания, переотложенная кора выветривания, геохимические критерии, Томь-Яйское междуречье.

Благодарности: исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 24-27-00022).

Для цитирования: Геохимические критерии золотоносности кор выветривания Томь-Яйского междуречья / В.Г. Ворошилов, Т.В. Тимкин, О.В. Савинова, Д.К. Молукпаева // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 8. – С. 37–48. DOI: 10.18799/24131830/2024/8/4659

UDC 553.411+551.311.231
DOI: 10.18799/24131830/2024/8/4659

Geochemical criteria of the gold content of the Tom-Yaya interfluvial weathering crusts

V.G. Voroshilov, T.V. Timkin✉, O.V. Savinova, D.K. Molukpaeva

National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

✉timkin@tpu.ru

Abstract. Relevance. Gold-bearing weathering crusts are widespread in the Tom-Yaya interfluvial, but the criteria for predicting their gold content, including geochemical ones, have not been adequately developed. **Aim.** To identify the geochemical features of the weathering crusts of the Tom-Yaya interfluvial to resolve issues of predicting their gold content. **Object.** Weathering crusts from the rocks of the Paleozoic basement of the Tom-Yaya interfluvial. **Methods.** The chemical composition of

weathering products was determined by ICP-mass spectrometry. Core samples of 36 wells for 20 elements were analyzed. The results obtained were processed in the statistical analysis software package Statistica. The main parameters of the distribution of chemical elements in the profiles of gold-bearing and non-gold-bearing weathering crusts were calculated, discriminant and factor analyzes were carried out. **Results.** Statistically significant differences in the chemical composition of the weathering profile zones were established. In weathering of non-gold-bearing rocks, the removal of P, Mn, Co, Ni, Zn and the accumulation of Cr, Mo, Ag, Sn, Sb, Hf, Tl, Pb, Bi occur with the indifferent behavior of Au, As, Fe, Cu. Gold-bearing weathering crusts are formed in mineralized zones and are initially enriched in Au, As, W, Sb, and, to a lesser extent, Cu, Zn, Pb, Bi, Tl, Hf, Sn. The average content of gold and most satellite elements (except Pb) decreases during the weathering of mineralized zones, but the dispersion increases many times, as a result of which areas of secondary enrichment in gold and satellite elements Sb, As, Ag, Sn, Tl, Co, Cu, Zn, Cd, Bi appear within the zones of hydrolysis and hydration. Geochemical associations characteristic of residual weathering crusts are largely preserved in redeposited crusts, where As, Sb, W, Cd, Ag, Sn, and Hf are accumulated together with gold.

Keywords: gold, residual weathering crust, redeposited weathering crust, geochemical criteria, Tom-Yaya interfluvial

Acknowledgements: The research was funded by the Russian Science Foundation (project No. 24-27-00022).

For citation: Voroshilov V.G., Timkin T.V., Savinova O.V., Molukpaeva D.K. Geochemical criteria of the gold content of the Tom-Yaya interfluvial weathering crusts. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 8, pp. 37–48. DOI: 10.18799/24131830/2024/8/4659

Введение

Актуальной задачей в области рационального природопользования в целом на территории России и Томской области в частности является расширение минерально-сырьевой базы стратегически важных металлов за счет выявления новых перспективных площадей. Потенциальный Томский рудный район имеет все геологические предпосылки для формирования золоторудных месторождений промышленного масштаба. Вследствие ориентирования геологических работ в регионе преимущественно на нефть и газ поисковая изученность района на рудное и гипергенное золото недостаточна. Поэтому изучение потенциально перспективных золотоносных кор выветривания является актуальной задачей для экономического развития Томской области. Интерес к золотоносным корам выветривания, располагающимся в близповерхностных условиях и характеризующимся высокой степенью дезинтеграции вещества, определяется рядом причин: возможностью открытой разработки, отсутствием необходимости дробления руды, простой технологией и высокой экономической эффективностью извлечения золота при низких его содержаниях [1–6].

За последнее время в Томь-Яйском междуречье выявлен ряд золоторудных объектов, общие ресурсы драгоценного металла которых оцениваются в десятки тонн. Так, в 2011–2015 гг. компанией ООО ГРК «Геосфера» в результате поисковых работ были оценены прогнозные ресурсы золота в линейных корах выветривания в количестве более 38 т по категории P_2 [3]. Этим перспективы района не ограничиваются, поэтому актуальным является вопрос дальнейшего исследования закономерностей концентрирования золота в корах выветривания и разработки критериев прогнозирования и поисков гипергенных месторождений золота.

Целью данного исследования является обоснование геохимических критериев золотоносности кор выветривания Томь-Яйского междуречья.

Геолого-структурная позиция золотоносных кор выветривания

В региональном плане изучаемый район находится в области сочленения крупных геологических структур – Колывань-Томской складчатой зоны, Западно-Сибирской плиты, Кузнецкого прогиба и Кузнецкого Алатау [7].

Коры выветривания сформированы по вулканогенно-терригенным отложениям и дайкам основного состава. Вулканогенные отложения среднедевонского возраста митрофановской свиты (D_2mt) представлены лавами базальтов, базальтовых порфиритов, их туфами, в меньшем количестве кислыми вулканитами, линзами известняков и известковистых туфоосадочных пород. На участках повышенной проницаемости породы преобразованы в метабазаальты и метаморфизованы до хлорит-серицитовых сланцев. Терригенные породы на площади работ представлены пачинской, юргинской свитами, нерасчлененной саламатовской и ярской толщей, лагерносадской и басандайской свитами. Пачинская свита (D_3pc) сложена отложениями трех подсвит. Нижняя подсвита представлена аргиллитами кремнистого состава с тонкими прослоями кварц-полевошпатовых песчаников и алевролитов с примесью туфогенного материала. Средняя подсвита образована битуминозными аргиллитами и алевролитами с конкрециями фосфоритов. Верхняя подсвита представлена алевролитами с редкими прослоями глинистых и алевролитистых известняков. В зонах тектонической нарушения породы свиты преобразованы в филлиты. Юргинская свита (D_3jur) подразделена на две подсви-

ты. Нижняя подсвита сложена кварц-полевошпатовыми, полимиктовыми мелко-, средне-грубозернистыми, гравелитистыми песчаниками с прослоями алевролитов, аргиллитов и глинистых сланцев. Саламатовская и ярская толщи (D_{3sl-C_1jar}) сложены алеврито-глинистыми, известково-глинистыми, углеродисто-глинистыми сланцами и глинистыми, слабоизвестковистыми алевролитами с тонкими прослоями тонко- и мелкозернистых известковистых полевошпат-кварцевых песчаников, в зонах метаморфизма породы часто филлитизированы. В составе лагерьносадской свиты (C_1lg) установлены алеврито-глинистые, реже углисто-глинистые сланцы с прослоями мелкозернистых песчаников и алевролитов. Басандайская свита (C_{1-2bs}) сложена средне-, мелко- и крупнозернистыми массивными кварц-полевошпатовыми, аркозовыми, иногда полимиктовыми песчаниками с прослоями алевролитов и глинистых сланцев. Интрузивные образования характеризуются значительным петрографическим разнообразием и представлены дайками томского ареала изылинского базитового комплекса ($\mu-\epsilon vT_{1-2t}$) [8, 9].

Сформировавшиеся коры выветривания по генезису делятся на остаточные (ОКВ) и переотложенные (ПКВ), по морфологии – на площадные и линейные. Коры выветривания характеризуются зональным строением профиля, в полном профиле остаточной коры выветривания присутствует три зоны: дезинтеграции, гидратации и гидролиза. В нижней части постоянно присутствует зона дезинтеграции, представленная слабыветрелыми, в различной степени трещиноватыми исходными терригенными породами с развивающимися по трещинам гидрослюдами и монтмориллонитом. Для зоны дезинтеграции по магматическим породам, сложенной темно-серыми в разной степени выветрелыми долеритами, характерно развитие по трещинам монтмориллонита, минералов группы гидрослюд и хлорита. Выше по разрезу зона дезинтеграции сменяется зоной гидратации, состав которой преимущественно каолинит-гидрослюдистый с дресвой и щебнем в различной степени выветрелых терригенных пород и кварца. В зоне гидратации магматических пород развиты следующие глинистые минералы: каолинит, минералы группы гидрослюд и в меньшей степени монтмориллонит. Наиболее преобразованная часть остаточной коры выветривания, зона гидролиза, представлена, как правило, бесструктурными глинами каолинит-гидрослюдистого состава с небольшим количеством минералов группы хлорита. В результате эрозии остаточных кор выветривания и плоскостного делювиального смыва происходит переотложение остаточных кор выветривания в виде аллювиально-пролювиальных отложений. Продукты переотложения остаточных кор выветривания

представлены пестрыми бесструктурными глинами. Наибольшие содержания золота приурочены к зоне гидролиза остаточной коры и переотложенной коре выветривания [7, 10, 11].

Фактический материал и методы исследования

Фактическим материалом для проведения исследования послужили более 1300 керновых проб из 36 скважин, пройденных ООО ГРК «Геосфера». Керновые пробы анализировались в Химико-аналитическом центре «Плазма» (г. Томск) методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ИСП-МС) на Ag, As, Au, Bi, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Hf, Mn, Mo, Ni, P, Pb, Sb, Sn, Tl, W и Zn. Анализ проводился на масс-спектрометрах ELAN-9000 DRC-e, Agilent-7700x, Agilent-7900. Изучен химический состав продуктов выветривания осадочных пород юргинской свиты позднедевонского возраста и магматических пород томского ареала изылинского базитового комплекса ранне-среднетриасового возраста.

Обработка всех геохимических данных и статистический анализ выполнены с использованием программного комплекса Statistica 12 (StatSoft). Определены основные параметры распределения химических элементов в профилях золотоносной и незолотоносной кор выветривания с использованием общепринятых статистических методов. Рассчитаны параметры распределения анализируемых элементов в сформированных выборках, с использованием рангового критерия Манна–Уитни оценено поведение элементов в процессах выветривания и накопления золота [12–15].

В рамках многомерной статистики проведены дискриминантный и факторный анализы, которые широко используются при интерпретации геохимических данных [16–20].

Результаты и обсуждение

Оценивая геохимические особенности золотоносных кор выветривания, необходимо иметь в виду, что речь идет о двух самостоятельных процессах: 1) образовании кор выветривания как региональных геологических продуктов и 2) формировании обогащенных золотом остаточных вторичных ореолов.

Для оценки поведения химических элементов в зоне гипергенеза сформированы выборки по всем выделенным зонам профиля выветривания, отдельно для золотоносных и незолотоносных участков. Расчеты показывают, что во всех выборках распределение всех исследованных элементов не соответствует нормальному закону, поэтому в качестве оценки средних содержаний выбраны средние геометрические значения. Соответственно, для проверки гипотез о равенстве неизвестных средних

использован непараметрический критерий Манна–Уитни. Распределение химических элементов в профиле незолотоносной коры выветривания иллюстрирует табл. 1.

Таблица 1. Сравнение содержаний химических элементов в зонах профиля незолотоносной коры выветривания

Table 1. Comparison of the contents of chemical elements in the profile zones of non-gold-bearing weathering crust

Элемент Element	Средние геометрические содержания, г/т Geometric averages, ppb			Значения критерия Манна–Уитни Mann–Whitney test		
	Зона дезинтеграции (a) Zone of disintegration (a)	Зона гидратации (b) Zone of hydration (b)	Зона гидролиза (c) Zone of hydrolysis (c)	Сравняемые выборки Comparable samples		
				b–a	c–b	c–a
P	681	327	369	–1,65	0,63	–2,86
Cr	61,8	84,4	87,3	5,30	2,00	5,09
Mn	590	52	127	–4,82	2,74	–3,42
Fe	30496	24297	27111	0,39	0,20	0,31
Co	13,5	9,54	5,96	–0,42	–2,08	–2,86
Ni	34,0	36,2	25,5	0,70	–3,18	–2,34
Cu	30,4	25,2	30,3	–1,66	2,70	1,15
Zn	81,4	62,4	36,1	0,40	–2,94	–4,01
As	7,42	5,27	5,59	–1,06	1,56	0,31
Mo	0,38	0,39	0,52	–0,02	3,23	2,35
Ag	0,04	0,05	0,06	2,45	1,19	3,08
Cd	0,11	0,12	0,10	–0,99	0,30	–0,62
Sn	1,27	1,48	1,51	2,67	1,20	2,52
Sb	0,39	0,63	0,62	3,33	0,08	3,38
Hf	1,57	2,72	2,75	3,15	0,47	3,18
W	0,59	0,17	0,22	–4,47	3,90	–3,29
Au	0,001	0,001	0,001	1,07	–1,51	–0,31
Tl	0,29	0,43	0,43	2,67	–0,05	2,60
Pb	6,85	12,3	11,4	3,85	–1,24	3,44
Bi	0,15	0,19	0,20	2,68	1,98	2,62

Примечание: При значении критерия Манна–Уитни $>1,96$ (по модулю) средние значения различаются с вероятностью $>95\%$.

Note: If the Mann–Whitney test value is >1.96 (modulo), the probability of difference in average contents exceeds 95%.

Отдельно для золотоносной и незолотоносной части остаточной коры выветривания проведен дискриминантный анализ для подтверждения различия между выделенными в разрезе зонами коры выветривания. Дискриминантный анализ показывает, что выделенные зоны незолотоносной коры выветривания уверенно различаются по своим геохимическим особенностям (рис. 1). Статистическая значимость различий превышает 99 %.

Сравнение средних значений показывает, что при гидратации дезинтегрированных пород происходит вынос Mn, W и накопление Cr, Ag, Sn, Sb,

Hf, Tl, Pb, Bi. В процессе дальнейшего гидролиза пород происходит перераспределение элементов с выносом Zn, Co, Ni и накоплением относительно зоны гидратации Cr, Mn, Mo, W. В итоге можно говорить о выносе в процессе выветривания P, Mn, Co, Ni, Zn и накоплении Cr, Mo, Ag, Sn, Sb, Hf, Tl, Pb, Bi при индифферентном поведении Au, As, Fe, Cu (табл. 2). Перераспределение элементов в целом незначительное (средние содержания изменяются не более чем в 1,5–2 раза) и вполне объясняется различиями в их гипергенной подвижности.

Таблица 2. Сравнение содержаний химических элементов в зонах профиля золотоносной коры выветривания

Table 2. Comparison of the contents of chemical elements in the profile zones of gold-bearing weathering crust

Элемент Element	Средние геометрические содержания, г/т Geometric averages, ppb			Значения критерия Манна–Уитни Mann–Whitney test		
	Зона дезинтеграции (a) Zone of disintegration (a)	Зона гидратации (b) Zone of hydration (b)	Зона гидролиза (c) Zone of hydrolysis (c)	Сравняемые выборки Comparable samples		
				b–a	c–b	c–a
P	535	432	326	–2,32	–3,66	–3,77
Cr	71,7	68,7	68,3	0,16	–0,46	–0,24
Mn	312	146	160	–3,21	0,84	–2,39
Fe	34060	27830	24097	–1,78	–1,57	–2,48
Co	13,37	11,34	9,65	–1,32	–1,06	–1,30
Ni	36,10	31,04	23,99	–1,18	–2,59	–2,53
Cu	43,97	38,35	32,15	–1,44	–1,76	–2,06
Zn	90,85	87,77	56,54	–0,11	–4,03	–2,62
As	186,3	53,7	103,3	–4,91	3,94	–3,19
Mo	0,48	0,46	0,61	–0,72	2,77	1,49
Ag	0,07	0,06	0,07	–0,66	0,10	–0,55
Cd	0,23	0,22	0,23	0,13	–0,50	–0,36
Sn	2,32	2,16	2,09	–1,25	–0,20	–0,79
Sb	7,62	3,10	4,55	–4,74	2,80	–3,25
Hf	3,88	3,42	3,73	–2,93	2,36	–0,93
W	13,8	4,8	4,04	–3,51	–0,69	–3,31
Au	0,020	0,004	0,005	–4,66	0,38	–4,46
Tl	0,67	0,57	0,55	–2,49	0,07	–1,84
Pb	11,01	13,63	19,66	2,19	5,72	4,77
Bi	0,23	0,21	0,24	–1,14	0,89	–0,36

Примечание: При значении критерия Манна–Уитни $>1,96$ (по модулю) средние значения различаются с вероятностью $>95\%$.

Note: If the Mann–Whitney test value is >1.96 (modulo), the probability of difference in average contents exceeds 95%.

Коры выветривания сульфидных месторождений («железные шляпы») традиционно являются источником легкоизвлекаемого золота. На территории Сибири извлечение этого золота началась еще в XVIII в., раньше, чем из россыпей.

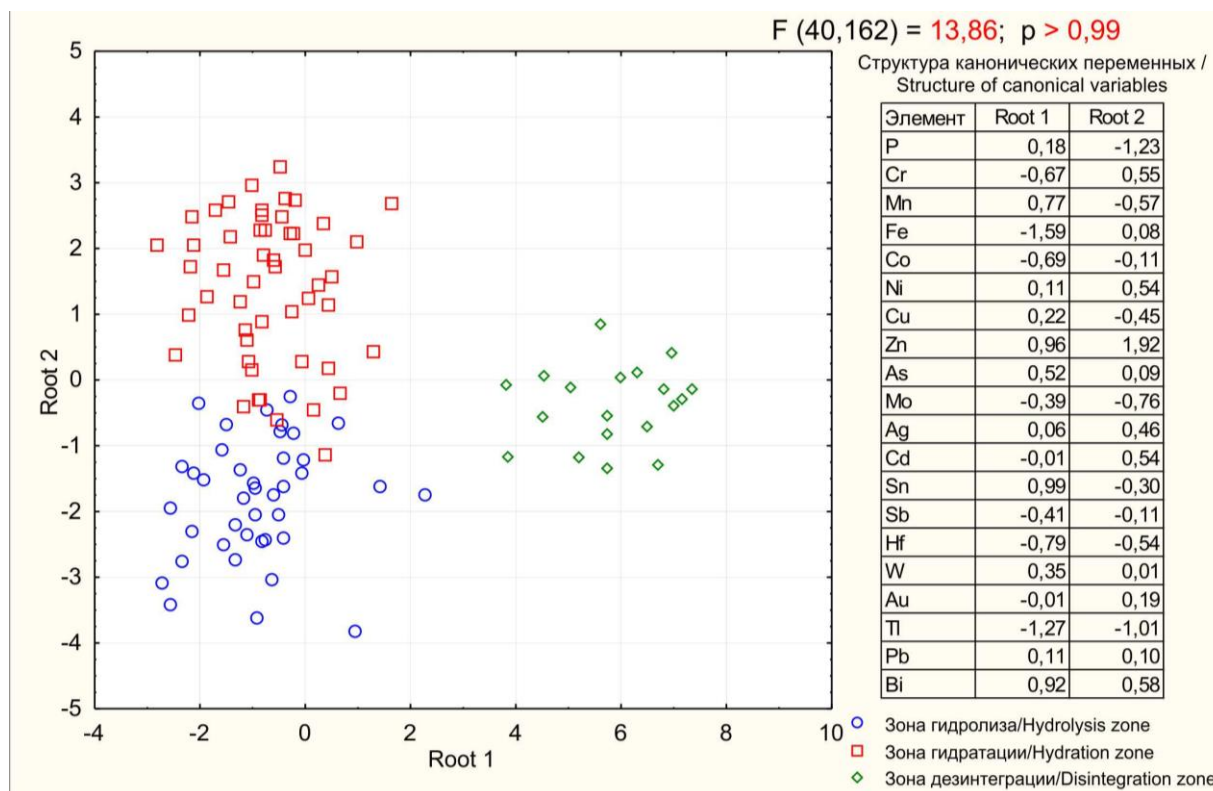


Рис. 1. Результат дискриминантного анализа эталонных выборок из незолотоносной коры выветривания
Fig. 1. Result of the discriminant analysis of reference samples from non-gold-bearing weathering crust

В то же время глинистые коры выветривания до 80-х гг. XX в. вообще не рассматривались в качестве возможных объектов промышленной добычи металла. В последние десятилетия в латеритных и каолиновых корах выветривания всего мира, включая Россию, открыты десятки месторождений золота, в том числе крупных, что позволило объединить их в самостоятельный геолого-промышленный тип. Характерной особенностью таких месторождений является их развитие не только по первичным золотым рудам, но и по слабозолотоносным гидротермально измененным породам и минерализованным зонам с бедной сульфидно-кварцевой минерализацией [21].

Золотоносные коры выветривания Томь-Яйского междуречья, в сравнении с незолотоносными, характеризуются резким повышением (на порядок и более) концентраций Au, As, W, Sb и незначительным (до 1,5–2 раз) возрастанием содержания других элементов-спутников золота: Cu, Zn, Pb, Bi, Tl, Hf, Sn, по всему профилю выветривания. Это свидетельствует о том, что золотоносные коры выветривания являются, по сути, остаточными вторичными ореолами гидротермальных зон минерализации. В частности, теми же элементами фиксируются зоны золоторудной минерализации в коренном залегании на Батуринском рудопроявлении золота, где минералами-спутниками

золота являются сульфиды – пирит, пирротин, арсенопирит, сфалерит, галенит и халькопирит. Все это подтверждает известное положение о том, что формирование рудоносных кор выветривания определяется в первую очередь присутствием рудного компонента в субстрате [21–23]. Такое условие является обязательным, но недостаточным. Имеются многочисленные примеры как наличия, так и отсутствия обогащенных гипергенным золотом зон на золоторудных месторождениях разных типов. Поэтому выяснение условий возникновения таких зон является важнейшим вопросом как в теоретическом, так и в прикладном аспектах.

Среднее содержание золота и большинства элементов-спутников (кроме Pb) от зоны дезинтеграции к зоне гидролиза снижается, но дисперсия возрастает на 1–2 порядка. Это означает, что участки выщелачивания сопряжены с областями переотложения элементов, и позволяет предполагать наличие зон вторичного обогащения золотом и элементами-спутниками. Золото может в этой ситуации осаждаться на частицах минерального субстрата, адсорбироваться глинистыми минералами либо непосредственно осаждаться из коллоидного раствора [24]. Такие интервалы с промышленно интересными содержаниями золота действительно вскрыты поисковыми скважинами в пределах зон гидролиза и гидратации.

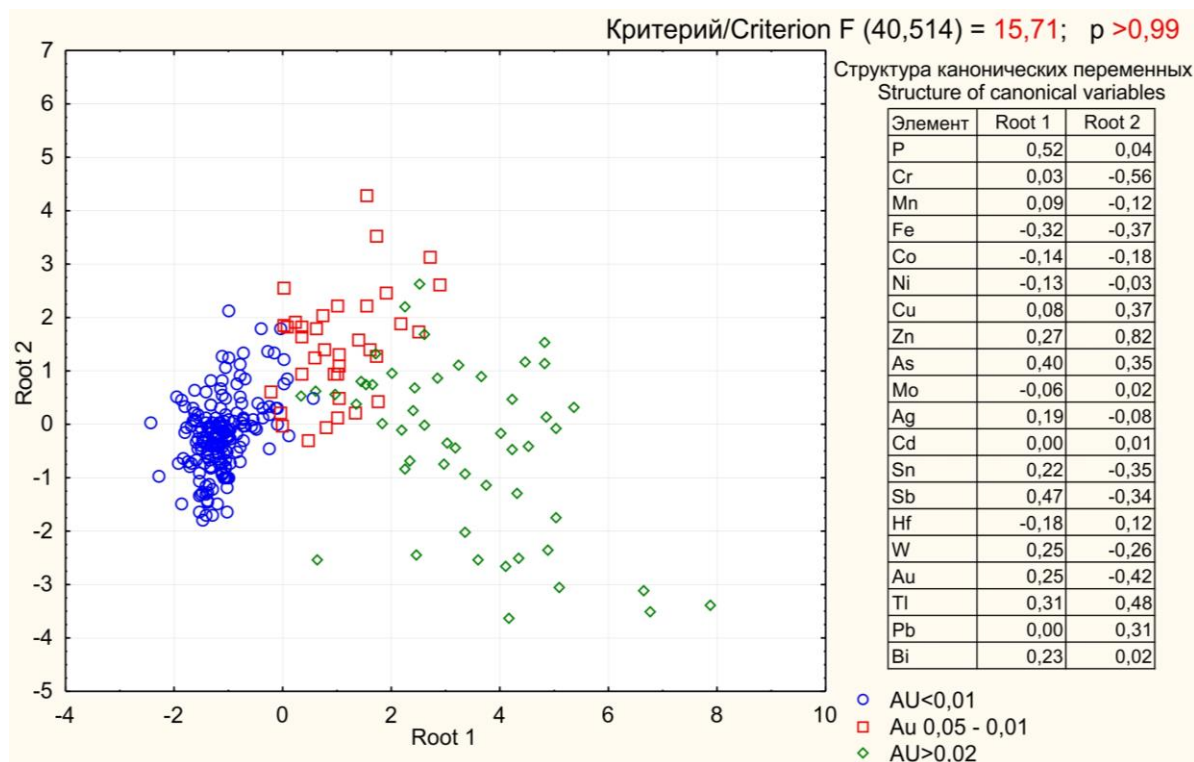


Рис. 2. Результат дискриминантного анализа эталонных выборок с разной золотоносностью коры выветривания
Fig. 2. Result of the discriminant analysis of reference samples with different gold content of the weathering crust

С целью выявления геохимических особенностей обогащенных золотом локальных интервалов сформированы три выборки из остаточных кор выветривания с содержаниями золота: 1) менее 1 мг/т; 2) от 5 до 10 мг/т; 3) более 20 мг/т.

Дискриминантный анализ показывает, что по геохимическим данным эти выборки различаются с вероятностью более 99,9 %, следовательно, прогноз золотоносности можно успешно осуществлять по данным геохимического опробования с использованием программ распознавания образов (рис. 2).

Сравнение выборок с использованием рангового критерия Манна–Уитни показывает, что синхронно с золотом устойчиво накапливаются Sb, As, Ag, Sn, Tl, в меньшей степени Co, Cu, Zn, Cd, Bi, обладающие высокой подвижностью в гипергенных условиях, в связи с чем содержание их в зоне гидролиза ниже, чем в зоне гидратации (табл. 2, 3). Фосфор, железо и марганец в процессе накопления золота частично перераспределяются, входя в состав новообразованных фосфатов, гидроокислов и карбонатов, но в целом среднее содержание их существенно не изменяется.

Характер перераспределения химических элементов в процессе оруденения находит отражение в многомерных корреляционных зависимостях, что позволяет использовать результаты факторного анализа для геометризации аномальных геохимических полей.

Результатом факторного анализа является матрица факторных нагрузок, которая содержит коэффициенты, представляющие взаимосвязи между факторами и переменными. Коэффициент с высоким абсолютным значением показывает, что фактор и переменная тесно взаимосвязаны. Для упрощения интерпретации факторов проведено вращение факторных осей методом варимакс [15, 17]. Критериев статистической значимости коэффициентов матрицы факторных нагрузок не существует, для удобства восприятия жирным шрифтом выделены их значения от 0,4 и выше, объединяющие, по опыту работ, наиболее информативные для данной ассоциации химические элементы (табл. 4).

По результатам факторного анализа по остаточным корам выветривания получена матрица факторных нагрузок, включающая четыре группы (фактора), объединяющих химические элементы, сходные по поведению в геологических процессах.

Факторный анализ показывает, что в остаточной коре выветривания золото тесно коррелируется с Sb, W, As, Cu (фактор 4). Вероятнее всего, эта ассоциация сохранилась от первичных руд, представляет собой остаточный вторичный ореол и может рассматриваться как геохимический признак золотого оруденения в коре выветривания. Мышьяк, сурьма, медь отмечаются в составе сульфидов, сопровождающих коренное оруденение и являются типичными элементами-спутниками золота [10, 25–28].

Таблица 3. Сравнение по критерию Манна-Уитни выборок с различной степенью золотоносности из остаточных кор выветривания

Table 3. Comparison by the Mann-Whitney test of samples with different degrees of gold content from residual weathering crusts

Элемент Element	Средние геометрические содержания, г/т Geometric averages, ppb			Значения критерия Манна-Уитни Mann-Whitney test		
	Выборка (a) Sampling (a)	Выборка (b) Sampling (b)	Выборка (c) Sampling (c)	Сравниваемые выборки Comparable samples		
				b-a	c-b	c-a
P	325	412	411	-0,56	-0,28	-0,78
Cr	87,6	66,9	75,7	1,83	3,85	4,20
Mn	69	154	146	2,06	-2,27	0,59
Fe	24476	28341	26384	2,77	-2,56	1,01
Co	6,63	10,68	15,43	3,51	-0,20	4,11
Ni	29,0	31,0	29,6	2,54	-2,61	1,57
Cu	26,4	35,5	52,3	3,02	1,79	4,91
Zn	45,3	84,7	84,3	3,34	-1,97	2,54
As	5,1	56,5	123,2	3,99	2,15	4,95
Mo	0,45	0,49	0,49	1,92	-0,18	2,22
Ag	0,05	0,06	0,09	2,57	2,54	4,62
Cd	0,11	0,23	0,24	2,44	-0,97	2,17
Sn	1,51	2,09	2,53	2,77	2,91	4,16
Sb	0,60	2,92	7,88	3,99	4,20	5,82
Hf	2,76	3,54	3,50	2,02	1,13	2,55
W	0,19	3,57	17,42	0,62	4,54	5,30
Au	0,001	0,003	0,063	6,86	8,39	7,18
Tl	0,43	0,55	0,72	3,33	2,89	4,59
Pb	12,4	14,9	13,7	2,92	-2,40	0,84
Bi	0,19	0,21	0,25	3,80	-0,18	3,26

Примечание: Выборка (a) – менее 1 мг/т; выборка (b) – от 5 до 10 мг/т; выборка (c) – более 20 мг/т. При значении критерия Манна-Уитни >1,96 (по модулю) средние значения различаются с вероятностью >95 %.
Note: Sample (a) – less than 1 mg/t; sample (b) – from 5 to 10 mg/t; sample (c) – more than 20 mg/t. If the Mann-Whitney test value is >1.96 (modulo), the probability of difference in average contents exceeds 95%.

Элементы Sn, Tl, Hf выделились в отдельную ассоциацию (фактор 2). Разрез вдоль типовой скважины Z35 показывает, что значения факторов 2 и 4 снизу вверх по профилю выветривания сначала синхронно возрастают, а в верхней зоне корреляция между ними становится обратная (рис. 3). То есть механизм накопления этих ассоциаций различный, соответственно, Sn, Tl, Hf прямыми индикаторами золотого оруденения в корях выветривания не являются.

Кора выветривания по дайке долеритов уверенно фиксируются повышенными концентрациями P, Hf, Zn, Fe (фактор 3), накопление фосфора связано с апатитом, гафния – обусловлено его примесью в цирконе [29, 30]. Золото с этой ассоциацией не коррелируется.

Фактор 1 объединяет группу элементов (Fe, Co, Ni, Mn, Cu, Zn), которые образуют повышенные содержания в основных породах. Fe, Co, Ni, Mn

относятся к сидерофильным, Cu, Zn – к халькофильным элементам. Повышенные значения фактора 1 отражают основность исходных пород и приурочены, прежде всего, к коре выветривания по дайкам долеритов. Рост интенсивности фактора 1 в верхней части скважины Z35 связан только с аномалиями Cu, Zn, Co, которые в данном случае отражают специфику первичного сульфидного оруденения (рис. 3).

Таблица 4. Результаты факторного анализа по остаточным и переотложенным корам выветривания

Table 4. Results of factorial analysis for residual and redeposited weathering crusts

Элемент Element	Остаточная кора выветривания Residual weathering crusts				Переотложенная кора выветривания Redeposited weathering crusts			
	F1	F2	F3	F4	F1	F2	F3	F4
P	0,30	0,01	0,74	-0,06	0,65	0,52	-0,25	-0,13
Cr	-0,13	0,12	-0,80	-0,04	0,30	-0,75	0,23	0,05
Mn	0,73	-0,03	0,01	0,07	0,77	0,17	-0,09	-0,11
Fe	0,69	-0,11	0,40	-0,10	0,82	-0,04	-0,19	-0,23
Co	0,81	-0,01	0,13	0,16	0,81	-0,07	-0,18	-0,07
Ni	0,43	0,37	0,04	-0,18	0,73	0,05	0,21	-0,22
Cu	0,40	0,10	-0,37	0,46	0,73	-0,20	0,00	0,21
Zn	0,56	0,24	0,50	-0,10	0,58	0,62	0,09	-0,14
As	-0,09	0,32	0,28	0,54	0,08	0,38	-0,10	0,73
Mo	0,14	-0,11	0,39	0,15	0,72	0,04	-0,05	0,15
Ag	0,03	0,18	-0,03	0,04	0,64	-0,01	0,02	0,35
Cd	0,39	0,21	0,19	-0,01	0,40	0,78	0,04	0,18
Sn	-0,09	0,82	0,16	0,14	-0,34	0,42	0,72	0,01
Sb	-0,03	0,28	0,17	0,76	0,05	0,53	0,15	0,51
Hf	-0,13	0,53	0,65	0,02	-0,21	0,83	0,21	0,19
W	0,16	-0,04	-0,10	0,60	0,01	0,02	-0,02	0,49
Au	-0,10	0,13	-0,01	0,67	-0,03	-0,07	0,08	0,63
Tl	0,44	0,62	-0,24	0,24	-0,13	0,02	0,84	0,10
Pb	0,06	0,25	0,09	0,14	0,70	-0,15	-0,06	0,25
Bi	0,00	0,74	-0,27	0,05	0,17	-0,48	0,64	-0,13

Таким образом, геохимическими признаками золотого оруденения в остаточных корях выветривания служат аномалии Au, As, Sb, W. Менее надежными индикаторами являются Zn, Cu, Co, Bi. Наблюдаемое иногда синхронное с золотом поведение Sn, Tl, Hf отражает, видимо, литологический контроль оруденения, поскольку эта ассоциация присутствует и в незолотоносной коре выветривания.

Характерной особенностью золотоносных кор выветривания во многих регионах является их тесная пространственная связь с переотложенными корами, также золотоносными. В Томь-Яйском междуречье в результате интенсивных тектонических движений в олигоцене и эоплейстоцене произошла существенная эрозия кор выветривания и их переотложение в виде аллювиально-пролювиальных отложений. Породы основания кирсановской свиты (pdN₂-Q_Еkr_с) являются типич-

ным примером переотложенных золотоносных кор выветривания. С практической точки зрения эти образования представляют несомненный интерес, поскольку содержания золота в них достигают 6,3 г/т [10]. Пространственно они часто тесно ассоциируют с золотоносными остаточными корами.

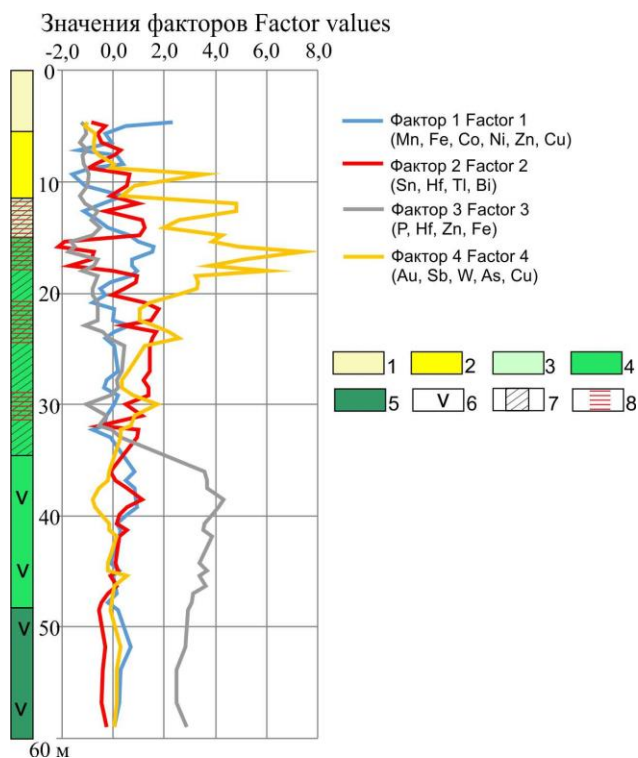


Рис. 3. Распределение геохимических ассоциаций в профиле золотоносной коры выветривания по скважине Z35: 1 – глинистые отложения тайгинской свиты (Q_{1-2tg}); 2 – близко- и дальнеприносные отложения кирсановской свиты (pdN_2-Q_{Ekr}); зоны остаточной мел-палеогеновой коры выветривания: 3 – гидролиза; 4 – гидратации; 5 – дезинтеграции; состав исходных пород: 6 – дайка долеритов ($\mu-\epsilon vT_{1-2t}$); 7 – песчаники с прослоями алевролитов, аргиллитов и глинистых сланцев юргинской свиты (D_{3jur}); 8 – дресва и щебень кварца

Fig. 3. Distribution of geochemical associations in the profile of the gold-bearing weathering crust: 1 – argillaceous deposits of the Taiga suite (Q_{1-2tg}); 2 – near- and far-bearing deposits of the Kirsanovskaya suite (pdN_2-Q_{Ekr}); zones of residual Cretaceous-Paleogene weathering crust: 3 – hydrolysis; 4 – hydration; 5 – disintegration; composition of the product: 6 – dolerite dike ($\mu-\epsilon vT_{1-2t}$); 7 – sandstones with interlayers of siltstones, mudstones and shales of the Yurga suite (D_{3jur}); 8 – gruss and crushed stone of quartz

Факторный анализ показывает, что геохимические ассоциации, характерные для остаточных кор выветривания, во многом сохраняются и в переот-

ложенных корах (табл. 4). В совокупности со слабой окатанностью золота это указывает на очень незначительные расстояния его переноса и позволяет рассматривать золотоносные объекты как комплексные корово-россыпные.

Таблица 5. Сравнение по критерию Манна–Уитни выборок с различной степенью золотоносности из переотложенных кор выветривания

Table 5. Comparison by the Mann–Whitney test of samples with different degrees of gold content from redeposited weathering crusts

Элемент Element	Средние геометрические содержания, г/т Geometric averages, ppb		Значения критерия Манна–Уитни Mann-Whitney test
	Незолотоносные отложения Non-gold-bearing rocks	Золотоносные отложения Gold-bearing deposits	
P	384	438	1,24
Cr	75,4	72,2	-1,45
Mn	517	323	-2,47
Fe	43258	31708	-2,10
Co	18,23	14,57	-0,83
Ni	36,16	32,91	0,40
Cu	33,58	32,27	-0,27
Zn	70,26	84,07	1,67
As	11,63	36,14	5,97
Mo	0,85	0,75	-1,32
Ag	0,05	0,06	2,00
Cd	0,10	0,21	5,39
Sn	1,89	2,20	3,39
Sb	1,14	3,62	5,92
Hf	2,06	3,06	3,92
W	0,84	3,87	4,64
Au	0,001	0,046	8,27
Tl	0,49	0,54	1,91
Pb	17,51	20,29	1,97
Bi	0,26	0,26	-1,25

Примечание: При значении критерия Манна–Уитни $>1,96$ (по модулю) средние значения различаются с вероятностью $>95\%$.

Note: If the Mann–Whitney test value is >1.96 (modulo), the probability of difference in average contents exceeds 95%.

Сравнение золотоносных и незолотоносных участков переотложенных кор выветривания показывает, что синхронно с золотом в них накапливаются As, Sb, W, Cd, Ag, Pb, Sn, Hf. Это практически тот же комплекс элементов, которым фиксируются золотоносные участки остаточных кор выветривания (табл. 3, 4). Значения критерия со знаком плюс в табл. 5 означают, что эти элементы (Au, As, Sb, W, Cd, Hf, Pb, Sn, Ag) накапливаются в золотоносных корах, в сравнении с незолотоносными. Знак минус характеризует обратную картину: содержания Mn и Fe в переотложенных золотоносных корах ниже, чем в незолотоносных.

Таким образом, общим геохимическим критерием золотоносности остаточных и переотложенных

кор выветривания является, в первую очередь, наличие аномалий Au, As, Sb, W, реже в комплексе с Sn, Hf, Cd. В остаточных корах с Au нередко коррелируют также Co, Zn, Cu; в переотложенных корах эта корреляция исчезает ввиду высокой подвижности Co, Zn и Cu в гипергенных условиях.

Заключение

В результате проведенных исследований установлено, что зоны профиля выветривания статистически значимо различаются между собой по химическому составу. В процессе выветривания незолотоносных пород происходит вынос P, Mn, Co, Ni, Zn и накопление Cr, Mo, Ag, Sn, Sb, Hf, Tl, Pb, Bi. Содержания Au, As, Fe, Cu при этом не изменяются.

Золотоносные коры выветривания формируются по минерализованным зонам и изначально обогащены Au, As, W, Sb, в меньшей мере – Cu, Zn, Pb,

Bi, Tl, Hf, Sn. Из-за окисления сульфидов процессы выветривания здесь более интенсивные, что приводит к выносу и перераспределению многих элементов. Среднее содержание золота и большинства элементов-спутников (кроме Pb) в процессе выветривания минерализованных зон снижается, но дисперсия многократно возрастает, вследствие чего в пределах зон гидролиза и гидратации возникают участки вторичного обогащения золотом и элементами-спутниками Sb, As, Ag, Sn, Tl, Co, Cu, Zn, Cd, Bi. Этот комплекс элементов является индикаторным при поисках промышленных скоплений золота в остаточных корах выветривания.

Геохимические ассоциации, характерные для остаточных кор выветривания в значительной степени сохраняются и в переотложенных корах, где совместно с золотом накапливаются As, Sb, W, Cd, Ag, Pb, Sn, Hf.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Риндзюнская Н.М., Полякова Т.П., Берзон Р.О. Месторождения золота в корах выветривания // Руды и металлы. – 1992. – № 1. – С. 62–69.
2. Gold in the weathering crust at the Suzdal' deposit (Kazakhstan) / Y.A. Kalinin, K.R. Kovalev, E.A. Naumov, M.V. Kirillov // Russian Geology and Geophysics. – 2009. – Vol. 50. – № 3. – P. 174–187. DOI: 10.1016/j.rgg.2008.09.002
3. Черняев Е.В. Томское золото // Глобус: Геология и бизнес. – 2009. – № 1. – С. 26–28.
4. Калинин Ю.А., Росляков Н.А. Прогнозно-поисковые критерии золотоносных кор выветривания (районы юга Сибири), Россия // Геология рудных месторождений. – 2012. – Т. 54. – № 2. – С. 157–167.
5. Reich M., Vasconcelos P.M. Geological and economic significance of supergene metal deposits // Elements. – 2015. – Vol. 11. – № 5. – P. 305–310. DOI: 10.2113/gselements.11.5.305
6. Craw D., Lilly K. Gold nugget morphology and geochemical environments of nugget formation, southern New Zealand // Ore Geology Reviews. – 2016. – Vol. 79. – P. 301–315. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2016.06.001
7. Характер распределения фосфатов в золотоносных корах выветривания Томского района / О.М. Янченко, В.Г. Ворошилов, Т.В. Тимкин, Т.Ю. Якич, М. Зиаи // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 9. – С. 74–91. DOI 10.18799/24131830/2021/9/3355
8. Гудымович С.С., Рычкова И.В., Рябчикова Э.Д. Геологическое строение окрестностей г. Томска (территории прохождения геологической практики). – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. – 84 с.
9. Парначев В.П., Парначев С.В. Геология и полезные ископаемые окрестностей города Томска. Материалы к полевой геологической экскурсии: справочное пособие. – Томск: ТГУ, 2010. – 144 с. URL: <https://www.geokniga.org/books/20635> (дата обращения 15.04.2024).
10. Черняев Е.В. Генезис и золотоносность кор выветривания Томского района // Цветные металлы и минералы: Сборник тезисов докладов восьмого международного конгресса. – Красноярск, 2016. – С. 336–337. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_29399062_12133767.pdf (дата обращения 15.04.2024).
11. Минерально-геохимическая зональность золотоносных кор выветривания Томь-Яйского междуречья / О.М. Янченко, В.Г. Ворошилов, Т.В. Тимкин, М. Зиаи // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330. – № 2. – С. 83–94. DOI: 10.18799/24131830/2019/2/98
12. Grunsky E.C. The interpretation of geochemical survey data // Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis. – 2010. – Vol. 10. – P. 27–74. DOI: 10.1144/1467-7873/09-210
13. Reimann C., Filzmoser P., Garrett R. Factor analysis applied to regional geochemical data: problems and possibilities // Applied Geochemistry. – 2002. – Vol. 17. – № 3. – P. 185–206. DOI: 10.1016/S0883-2927(01)00066-X
14. Боровиков В. STATISTICA. Искусство анализа данных на компьютере: для профессионалов. – СПб.: Питер, 2003. – 688 с.
15. Поротов Г.С. Математические методы моделирования в геологии. – СПб: Изд-во Санкт-Петербургского горного института, 2006. – 223 с. URL: <https://www.geokniga.org/bookfiles/geokniga-matematicheskie-metody-modelirovaniya-v-geologii-gsporotov-2006.pdf> (дата обращения 15.04.2024).
16. Statistical data analysis explained: applied environmental statistics with R / C. Reimann, P. Filzmoser, R.G. Garrett, R. Dutter. – New Haven: John Wiley & Sons, 2008. – 362 p. DOI: 10.1002/9780470987605
17. Carranza E.J.M. Analysis and mapping of geochemical anomalies using logratio-transformed stream sediment data with censored values // Journal of Geochemical Exploration. – 2011. – Vol. 110. – № 2. – P. 167–185. DOI: 10.1016/j.gexplo.2011.05.007
18. Environmental geochemical mapping and multivariate geostatistical analysis of heavy metals in topsoils of a closed steel smelter: Capital Iron & Steel Factory, Beijing, China / G.L. Yuan, T.H. Sun, P. Han, J. Li // Journal of Geochemical Exploration. – 2013. – Vol. 130. – P. 15–21. DOI: doi.org/10.1016/j.gexplo.2013.02.010

19. Geochemical exploration for lithium in NE Iran using the geochemical mapping prospectivity index, staged factor analysis, and a fractal model / H. Saadati, P. Afzal, H. Torshizian, A. Solgi // *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*. – 2020. – Vol. 20. – №. 4. – P. 461–472. DOI: 10.1144/geochem2020-020
20. Geochemical mapping by stream sediments of the NW portion of Quadrilátero Ferrífero, Brazil: application of the exploratory data analysis (EDA) and a proposal for generation of new gold targets in Pitangui gold district / E.D. Marques, C.C. Castro, R. de Assis Barros, J.C. Lombello, M. de Souza Marinho, J.C.S. Araújo, E.A.M. Santos // *Journal of Geochemical Exploration*. – 2023. – Vol. 250. – P. 1–25. DOI: 10.1016/j.gexplo.2023.107232
21. Росляков Н.А. Геохимия золота в зоне гипергенеза, – Новосибирск: Наука, 1981. – 240 с. URL: <https://www.geokniga.org/books/13869> (дата обращения 15.04.2024).
22. Михайлов Б.М. Принципы и методы оценки рудоносности геологических формаций. Рудоносные коры выветривания. – Л.: Недра, 1986. – 238 с. URL: <https://www.geokniga.org/books/3630> (дата обращения 15.04.2024).
23. Калинин Ю.А., Росляков Н.А., Прудников С.Г. Золотоносные коры выветривания юга Сибири. – Новосибирск: Академическое издательство «Гео», 2006. – 339 с. URL: <https://www.geokniga.org/books/6493> (дата обращения 15.04.2024).
24. Wierchowicz J., Mikulski S.Z., Zieliński K. Supergene gold mineralization from exploited placer deposits at Dziwiszów in the Sudetes (NE Bohemian Massif, SW Poland) // *Ore Geology Reviews*. – 2021. – Vol. 131 (2). – 104049. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2021.104049
25. Gossan mineralogy, textures, and gold enrichment over the Au (As, Bi, Ag) deposit in the Buracao Area (Brasília Fold Belt, Brazil): implications for gold prospecting in weathering profiles / G.L.C. Pires, C. Renac, E.M. Bongioiolo, R. Neumann // *Journal of Geochemical Exploration*. – 2020. – Vol. 218. – 106615. DOI: 10.1016/j.gexplo.2020.106615
26. Dunn S., Von der Heyden B. Gold remobilization in gossans of the Amani area, southwestern Tanzania // *Ore Geology Reviews*. – 2021. – 131:1040334. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2021.104033
27. Зубова Т.П., Позднякова Н.Н. Минералого-геохимические поисковые признаки золото-полисульфидно-кварцевого оруденения в ряду «коренной источник – кора выветривания – россыпь» (на примере Урала) // *Отечественная геология*. – 2022. – № 1. – С. 49–58. DOI: 10.47765/0869-7175-2022-10003
28. Минералого-геохимическая характеристика и вероятные коренные источники самородного золота россыпей Кельбес-Золотокитатского района (северная часть Кузнецкого Алатау) / В.В. Колпаков, Г.В. Нестеренко, П.А. Неволько, С.М. Жмодик // *Геосферные исследования*. – 2021. – № 3. – С. 42–55. DOI: 10.17223/25421379/20/3
29. Родыгина В.Г. Курс геохимии. – Томск: Изд-во НТЛ, 2006. – 288 с. URL: <https://www.geokniga.org/bookfiles/geokniga-rodyginakursgeohimii2006v2.pdf> (дата обращения 15.04.2024).
30. Clift P.D., Wan Sh., Blusztajn J. Reconstructing chemical weathering, physical erosion and monsoon intensity since 25 Ma in the northern South China Sea: a review of competing proxies // *Earth-Science Reviews*. – 2014. – Vol. 130. – P. 86–102. DOI: 10.1016/j.earscirev.2014.01.002

Информация об авторах

Валерий Гаврилович Ворошилов, доктор геолого-минералогических наук, профессор отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. v_g_v@tpu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0955-5750>

Тимофей Васильевич Тимкин, кандидат геолого-минералогических наук, доцент отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. timkin@tpu.ru, <http://orcid.org/0000-0002-8113-3555>

Олеся Вячеславовна Савинова, кандидат геолого-минералогических наук, доцент отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. logvinenkoov@tpu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7925-6150>

Диана Калибековна Молукпаева, аспирант отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. dkm3@tpu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0495-4456>

Поступила в редакцию: 18.04.2024

Поступила после рецензирования: 23.04.2024

Принята к публикации: 16.05.2024

REFERENCES

1. Rindzyunskaya N.M., Polyakova T.P., Berzon R.O. Gold deposits in weathering crusts. *Ores and metals*, 1992, no. 1, pp. 62–69. (In Russ.)
2. Kalinin Y.A., Kovalev K.R., Naumov E.A., Kirillov M.V. Gold in the weathering crust at the Suzdal’deposit (Kazakhstan). *Russian Geology and Geophysics*, 2009, vol. 50, no. 3, pp. 174–187. DOI: 10.1016/j.rgg.2008.09.002
3. Chernyaev E.V. Tomsk gold. *Globe: Geology and business*, 2009, no. 1, pp. 26–28. (In Russ.)
4. Kalinin Yu.A., Roslyakov N.A. Forecasting and prospecting criteria for gold-bearing weathering crusts (regions of southern Siberia), Russia. *Geology of ore deposits*, 2012, vol. 54, no. 2, pp. 157–167. (In Russ.)

5. Reich M., Vasconcelos P. M. Geological and economic significance of supergene metal deposits. *Elements*, 2015, vol. 11, no. 5, pp. 305–310. DOI: 10.2113/gselements.11.5.305
6. Craw D., Lilly K. Gold nugget morphology and geochemical environments of nugget formation, southern New Zealand. *Ore Geology Reviews*, 2016, vol. 79, pp. 301–315. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2016.06.001
7. Yanchenko O.M., Voroshilov V.G., Timkin T.V., Yakich T. Yu., Ziaii M. The nature of the distribution of phosphates in gold-bearing weathering crusts of the Tomsk region. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 9, pp. 74–91. (In Russ.) DOI 10.18799/24131830/2021/9/3355
8. Gudymovich S.S., Rychkova I.V., Ryabchikova E.D. *Geological structure of the environs of Tomsk (territories of geological practice)*. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ. House, 2009. 84 p. (In Russ.)
9. Parnachev V.P., Parnachev S.V. *Geology and minerals of the environs of the city of Tomsk. Materials for a geological field excursion: reference guide*. Tomsk, TSU Publ., 2010. 144 p. (In Russ.) Available at: <http://geokniga-geologiya-i-poleznye-iskopaemye-okrestnostey-goroda-tomska.pdf> (accessed 15 April 2024).
10. Chernyaev E.V. Genesis and gold content of weathering crusts in the Tomsk region. *Non-ferrous metals and minerals: Collection of abstracts of the eighth international congress*. Krasnoyarsk, 2016. pp. 336–337. (In Russ.) Available at: https://elibrary.ru/download/elibrary_29399062_12133767.pdf (accessed 15 April 2024).
11. Yanchenko O.M., Voroshilov V.G., Timkin T.V., Ziai M. Mineral-geochemical zoning of gold-bearing weathering crusts of the Tom-Yaya interfluvium. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 2, pp. 83–94. (In Russ.) DOI: 10.18799/24131830/2019/2/98
12. Grunsky E.C. The interpretation of geochemical survey data. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 2010, vol. 10, pp. 27–74. DOI: 10.1144/1467-7873/09-210
13. Reimann C., Filzmoser P., Garrett R. Factor analysis applied to regional geochemical data: problems and possibilities. *Applied Geochemistry*, 2002, vol. 17, no. 3, pp. 185–206. DOI: 10.1016/S0883-2927(01)00066-X
14. Borovikov V. *STATISTICA. The art of data analysis on a computer: for professionals*. St. Petersburg, Piter Publ., 2003. 688 p. (In Russ.)
15. Porotov G.S. *Mathematical modeling methods in geology*. St. Petersburg, St. Petersburg Mining Institute Publ. House, 2006. 223 p. (In Russ.) Available at: <https://www.geokniga.org/bookfiles/geokniga-matematicheskie-metody-modelirovaniya-v-geologii-gsporotov-2006.pdf> (accessed 15 April 2024).
16. Reimann C., Filzmoser P., Garrett R.G., Dutter R. *Statistical data analysis explained: applied environmental statistics with R*. New Haven, John Wiley & Sons, 2008. 362 p. DOI: 10.1002/9780470987605
17. Carranza E.J.M. Analysis and mapping of geochemical anomalies using logratio-transformed stream sediment data with censored values. *Journal of Geochemical Exploration*, 2011, vol. 110, no. 2, pp. 167–185. DOI: 10.1016/j.gexplo.2011.05.007
18. Yuan G.L., Sun T.H., Han P., Li J. Environmental geochemical mapping and multivariate geostatistical analysis of heavy metals in topsoils of a closed steel smelter: Capital Iron & Steel Factory, Beijing, China. *Journal of Geochemical Exploration*, 2013, vol. 130, pp. 15–21. DOI: doi.org/10.1016/j.gexplo.2013.02.010
19. Saadati H., Afzal P., Torshizian H., Solgi A. Geochemical exploration for lithium in NE Iran using the geochemical mapping prospectivity index, staged factor analysis, and a fractal model. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 2020, vol. 20, no. 4, pp. 461–472. DOI: 10.1144/geochem2020-020
20. Marques E.D., Castro C.C., De Assis Barros R., Lombello J.C., De Souza Marinho M., Araújo J.C.S., Santos E.A.M. Geochemical mapping by stream sediments of the NW portion of Quadrilátero Ferrífero, Brazil: application of the exploratory data analysis (EDA) and a proposal for generation of new gold targets in Pitangui gold district. *Journal of Geochemical Exploration*, 2023, vol. 250, pp. 1–25. DOI: 10.1016/j.gexplo.2023.107232
21. Roslyakov N.A. *Geochemistry of gold in the hypergenesis zone*. Novosibirsk, Nauka Publ., 1981. 240 p. (In Russ.) Available at: <https://www.geokniga.org/books/13869> (accessed 15 April 2024).
22. Mikhailov B.M. *Principles and methods for assessing the ore content of geological formations. Ore-bearing weathering crusts*. Leningrad, Nedra Publ., 1986. 238 p. (In Russ.) Available at: <https://www.geokniga.org/books/3630> (accessed 15 April 2024).
23. Kalinin Yu.A., Roslyakov N.A., Prudnikov S.G. *Gold-bearing weathering crusts of southern Siberia*. Novosibirsk, Geo Academic Publ. House, 2006. 339 p. (In Russ.) Available at: <https://www.geokniga.org/books/6493> (accessed 15 April 2024).
24. Wierchowicz J., Mikulski S.Z., Zieliński K. Supergene gold mineralization from exploited placer deposits at Dziwiszów in the Sudetes (NE Bohemian Massif, SW Poland). *Ore Geology Reviews*, 2021, vol. 131 (2), 104049. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2021.104049
25. Pires G.L.C., Renac C., Bongioiolo E.M., Neumann R. Gossan mineralogy, textures, and gold enrichment over the Au (As, Bi, Ag) deposit in the Buracao Area (Brasília Fold Belt, Brazil): Implications for gold prospecting in weathering profiles. *Journal of Geochemical Exploration*, 2020, vol. 218, 106615. DOI: 10.1016/j.gexplo.2020.106615
26. Dunn S., Von der Heyden B. Gold remobilization in gossans of the Amani area, southwestern Tanzania. *Ore Geology Reviews*, 2021, vol. 131, 1040334. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2021.104033
27. Zubova T.P., Pozdnyakova N.N. Mineralogical and geochemical prospecting signs of gold-polysulfide-quartz mineralization in the series “root source – weathering crust – placer” (using the example of the Urals). *Domestic Geology*, 2022, no. 1, pp. 49–58. (In Russ.) DOI: 10.47765/0869-7175-2022-10003
28. Kolpakov V.V., Nesterenko G.V., Nevolko P.A., Zhmodik S.M. Mineralogical and geochemical characteristics and probable primary sources of native gold from placers in the Kelbes-Zolotokitatsky region (northern part of Kuznetsk Alatau). *Geosphere Research*, 2021, no. 3, pp. 42–55. (In Russ.) DOI: 10.17223/25421379/20/3
29. Rodygina V.G. *Geochemistry course*. Tomsk, NTL Publ. House, 2006. 288 p. (In Russ.) Available at: <https://www.geokniga.org/bookfiles/geokniga-rodyginakursgeohimii2006v2.pdf> (accessed 15 April 2024).
30. Clift P.D., Wan Sh., Blusztajn J. Reconstructing chemical weathering, physical erosion and monsoon intensity since 25 Ma in the northern South China Sea: a review of competing proxies. *Earth-Science Reviews*, 2014, vol. 130, pp. 86–102. DOI: 10.1016/j.earscirev.2014.01.002

Information about the authors

Valery G. Voroshilov, Dr. Sc., Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. v_g_v@tpu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0955-5750>

Timofey V. Timkin, Cand. Sc., Associate Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. timkin@tpu.ru, <http://orcid.org/0000-0002-8113-3555>

Olesya V. Savinova, Cand. Sc., Associate Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. logvinenkoov@tpu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7925-6150>

Diana K. Molukpaeva, Postgraduate Student, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. dkm3@tpu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0495-4456>

Received: 18.04.2024

Revised: 23.04.2024

Accepted: 16.05.2024

УДК 622.276

DOI: 10.18799/24131830/2024/8/4397

Шифр специальности ВАК: 2.8.4

Комплексное обоснование допустимой погрешности при выполнении гидравлического расчета системы поддержания пластового давления

П.Ю. Илюшин, К.А. Вяткин, А.В. Козлов✉

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Россия, г. Пермь

✉anton.kozlov@girngm.ru

Аннотация. **Актуальность** исследования заключается в необходимости определения допустимых погрешностей гидравлических расчетов поверхностных трубопроводов системы поддержания пластового давления. Это необходимо делать в том числе ввиду изменения свойств попутно добываемой воды. Вследствие перехода большинства месторождений на поздние стадии разработки повышается обводненность добываемой продукции, изменяется состав и свойства пластовых вод вследствие прорыва закачиваемой воды. Данные обстоятельства могут привести к существенному изменению минерализации, состава и Ph воды, что необходимо учитывать при численном моделировании. **Цель:** создание номограммы для оценки погрешности, возникающей вследствие изменения свойств попутно добываемой воды, на численное моделирование работы напорных трубопроводов системы поддержания пластового давления. **Методы:** гидравлические расчёты в программном обеспечении «Инженерный симулятор технологических процессов», анализ свойств проб попутно добываемой воды в лаборатории, оценка плотности проб попутно добываемой воды в программном продукте PVTsim 20. **Результаты.** Исследования проведены на пробах попутно добываемой воды, взятых с семи скважин. Значение минерализации в системе поддержания пластового давления в течение года изменяется от 247,85 до 327,79 г/дм³. Расчётная плотность изменяется в пределах от 1188 до 1255 кг/м³. Для расчёта давления на устье нагнетательной скважины в ходе закачки воды взяты пробы с наибольшей, средней и наименьшей плотностью. Анализируя полученные данные, можно отметить сильное влияние свойств воды на значения устьевых давлений. На основе проведённых исследований создана номограмма для определения степени влияния изменения свойств воды в ходе гидравлического расчёта с учётом приёмыстости нагнетательных скважин и длины трубопроводов на распределение давления в системе. **Выводы.** В ходе численного моделирования довольно затруднительно учесть все параметры, влияющие на точность получаемых расчётов. Для этого предлагается использовать созданную номограмму, позволяющую оценить допустимые погрешности гидравлического расчета путем учета вариативности свойств воды, направляемой в систему поддержания пластового давления.

Ключевые слова: свойства воды, попутно добываемая вода, потери давления, численное моделирование, система поддержания пластового давления

Благодарности: Работа выполнена в организации Головного исполнителя в рамках составной части НИОКР при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (соглашение № 075-11-2021-052 от 24 июня 2021 г.) в соответствии с постановлением Правительства РФ от 09.04.2010 №218 (ПРОЕКТ 218). Головной исполнитель НИОКР – ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет».

Для цитирования: Илюшин П.Ю., Вяткин К.А., Козлов А.В. Комплексное обоснование допустимой погрешности при выполнении гидравлического расчета системы поддержания пластового давления // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 8. – С. 49–55. DOI: 10.18799/24131830/2024/8/4397

UDC 622.276

DOI: 10.18799/24131830/2024/8/4397

Comprehensive justification of the errors at hydraulic calculation of the reservoir pressure maintenance system

P.Yu. Ilyushin, K.A. Vyatkin, A.V. Kozlov✉

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

✉anton.kozlov@girngm.ru

Abstract. Relevance. The need to determine the permissible errors of hydraulic calculations of surface pipelines of the reservoir pressure maintenance system. This must be done, among other things, due to changes in the properties of produced water. As a result of the transition of most fields to the late stages of development, the water content of the extracted products increases, the composition and properties of reservoir waters change due to the breakthrough of the injected water. These circumstances can lead to significant changes in the mineralization, composition and Ph of water, which must be taken into account in numerical modeling. **Aim.** Creation of a nomogram for estimating the error in the course of changing the properties of produced water for numerical modeling of the operation of pressure pipelines of the reservoir pressure maintenance system. **Methods.** Hydraulic calculations in the engineering process simulator software, analysis of the properties of produced water samples in the laboratory, assessment of the density of produced water samples in the PVTsim 20 software product. **Results.** The studies were carried out on samples of produced water taken from seven wells. The value of salinity in the reservoir pressure maintenance system during the year varies from 247.85 to 327.79 g/dm³. The calculated density varies from 1188 to 1255 kg/m³. To calculate the pressure at the mouth of the injection well during water injection, samples with the highest, average and lowest density were taken. Analyzing the obtained data, a strong effect of water properties on the values of wellhead pressures is noticeable. On the basis of the conducted studies, a nomogram was created to determine the degree of influence of changes in water properties in the course of hydraulic calculation, taking into account the specific-injectivity index of injection wells and the length of pipelines. **Conclusion.** In the course of numerical modeling, it is quite difficult to take into account all the parameters that affect the accuracy of the calculations obtained. To do this, it is proposed to use the created nomogram, which allows estimating the permissible errors of hydraulic calculation taking into account the variability of the properties of water sent to the reservoir pressure maintenance system.

Keywords: water properties, produced water, pressure losses, numerical modeling, reservoir pressure maintenance system

Acknowledgements: The work was carried out in the organization of the Lead Contractor as part of the R&D, with the financial support from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (agreement number 075-11- 2021- 052 of 24 June 2021) in accordance with the decree of the Government of the Russian Federation: 09.04.2010, number 218 (PROJECT 218). The main R&D contractor is the Perm National Research Polytechnic University.

For citation: Ilyushin P.Yu., Vyatkin K.A., Kozlov A.V. Comprehensive justification of the errors at hydraulic calculation of the reservoir pressure maintenance system. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 8, pp. 49–55. DOI: 10.18799/24131830/2024/8/4397

Введение

В настоящее время большинство месторождений переходят на поздние стадии разработки [1–3]. Данные обстоятельства приводят к повышению обводненности добываемой продукции, повышенному вниманию к энергетической эффективности работы месторождения, а также к оптимизации его работы [4, 5]. Ввиду увеличения количества попутно добываемой воды ухудшается качество её подготовки, так как при проектировании промышленных объектов не всегда учитываются все возможные сценарии развития процесса разработки месторождения [6–9].

Подготовка попутно добываемой воды подразумевает её очистку от остаточных загрязнений нефти. Зачастую процесс разделения продукции

скважин заключается в горячем или холодном отстое продукции с добавлением химических реагентов – деэмульгаторов. Реже производится фильтрация воды через жидкостные гидрофобные фильтры. Для достижения наименьшей концентрации нефти в попутно добываемой воде применяют ультрафильтрацию, пропуская воду через очищающую мембрану под высоким давлением [10–12]. Как отмечалось выше, на большинстве месторождений наблюдается увеличение обводненности нефти. Это, в свою очередь, увеличивает вероятность образования нерастворимых сульфатных солей, твёрдый осадок которых крайне трудно удалить [13]. Большое содержание данных солей значительно влияет на состав, минерализацию и pH попутно добываемой воды [14].

На сегодняшний день повсеместно внедряются цифровые технологии для автоматизации всех этапов добычи и транспортировки нефти [15, 16]. В частности, создаются цифровые двойники месторождений [17–19]. Ввиду учёта реальной конструкции скважин и наземных трубопроводов данное программное обеспечение (ПО) позволяет численно моделировать все динамические процессы на нефтяном месторождении. Одним из представителей таких программ является «Инженерный симулятор технологических процессов» («ИСТП»), разработанный в Научно-образовательном центре «Геология и разработка нефтяных и газовых месторождений» [20]. Данное ПО позволяет моделировать процессы добычи и транспорта углеводородов, предупреждать о различных отклонениях и аварийных ситуациях в работе системы, проектировать инфраструктуры с возможностью задания ограничений, таких как особенности рельефа, охранная зона и другие.

Одной из важных проблем при работе с цифровыми моделями является вопрос настройки модели на фактические данные. Так, во всех программных продуктах реализованы поправочные коэффициенты, позволяющие настроить текущие давления на фактические. Необходимость настройки возникает ввиду эксплуатации реальных, а не идеальных трубопроводов, которые могут быть засорены или деформированы. При этом важно учитывать, что модель месторождения настраивается на конкретные значения плотности, минерального состава и вязкости флюида. Вследствие этого точность моделирования работы системы поддержания пластового давления с течением времени может изменяться. Данная работа направлена на оценку влияния изменения состава попутно добываемой воды на работу системы поддержания пластового давления (ППД) и определение допустимой погрешности выполнения гидравлических расчетов.

Материалы и методы

Программное обеспечение «Инженерный симулятор технологических процессов»

Инженерный симулятор технологических процессов – уникальное ПО для динамического моделирования добычи углеводородов (цифровой двойник), отечественная разработка, превосходящая по своему функционалу мировые аналоги OLGA (Schlumberger) и IPM (Petroleum Experts) [21]. Данное программное обеспечение позволяет проводить гидравлические расчеты в статическом и динамическом режиме, подбирать глубинно-насосное оборудование, моделировать образования АСПО. Перечень функций ПО «ИСТП» постоянно обновляется и расширяется.

Методика выполнения гидравлических расчетов в ПО «ИСТП»

Гидравлические расчеты в ПО «ИСТП» в вопросе расчета системы поддержания пластового давления выполняются по классическим формулам гидравлики. Данные формулы приведены в различных источниках, например в [22, 23]. В гидравлическом расчете трубопровода присутствуют два параметра транспортируемого флюида – плотность и вязкость. Расчет вязкости воды выполняется по корреляционной зависимости, приведенной в ГСССД Р-776-98 [24]. Плотность же принимается как регулируемый параметр.

Параметры работы рассчитываемого участка системы поддержания пластового давления

В табл. 1 приведены технологические параметры работы данной системы поддержания пластового давления. Давление на блочной кустовой насосной станции (БКНС) равно 21,3 МПа.

Таблица 1. Параметры работы системы поддержания пластового давления

Table 1. Parameters of reservoir pressure maintenance system operation

Параметр Parameter	Размерность Dimension	Скважина/Well						
		1	2	3	4	5	6	7
Приемистость скважины Well injectivity	м³/сут m³/day	80	60	200	100	60	45	90
Длина водопровода до скважины Water supply length to the well	м/m	3071	3640	4349	5049	5915	6763	6767

Результаты определения свойств воды системы поддержания пластового давления

Свойства попутно добываемой воды изучаются путем прямого отбора пробы воды с кустовой насосной станции (КНС) и исследования образца в лаборатории. Определяются состав воды, минерализация, рН. рН воды определялся методом ПНДФ 14.1:2:3.4.121-97, содержание CO₃ и HCO₃ – по ГОСТ 31957, методом А, Cl – по ГОСТ 26449.1, SO₄ – по ФР 1.31.200200644, Ca – по ПНДФ 14.1:2:3.95-97.

Поскольку в рамках тестирования пробы воды плотность не определяется, данный параметр определен по результатам моделирования свойств пробы пластовой воды в программном продукте PVTsim 20. В состав воды добавлялось расчетное количество солей и воды, вычисления происходили при давлении 18 МПа (осредненное давление в системе поддержания пластового давления) и температуре 10 °С.

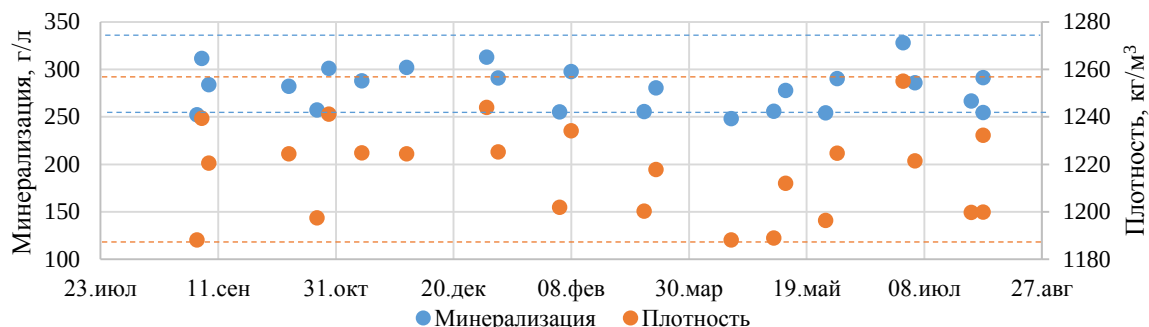


Рис. 1. Динамика изменения свойств попутно добываемой воды в течение рассматриваемого периода
Fig. 1. Dynamics of changes in the properties of produced water during the period under review

Результаты расчета

В результате анализа проб воды, направляемых в систему поддержания пластового давления, построена диаграмма, приведенная на рис. 1. Срок рассмотрения – один календарный год. На диаграмме приводятся лишь значения расчетной плотности и измеренной минерализации.

На основании полученного графика можно сделать вывод, что минерализация воды, направляемой в систему поддержания пластового давления, составляет от 247,85 до 327,79 г/дм³. При этом среднее значение составляет 280 г/дм³. Плотность же за рассматриваемый период изменяется от 1188 до 1255 кг/м³ при среднем значении 1215 кг/м³. Дальнейшее моделирование будет производиться для трех свойств пластовой воды, которые характеризуются наименьшей, средней и наибольшей плотностью.

Моделирование работы рассматриваемой системы поддержания пластового давления выполняется в ПО «ИСТП» с применением трех моделей пластовой воды, определенных ранее. В результате моделирования оцениваются значения устьевых давлений на всех нагнетательных скважинах. Результаты выполненного моделирования представлены в табл. 2.

Таблица 2. Результаты моделирования устьевого давления на нагнетательных скважинах при различных свойствах нагнетаемого агента

Table 2. Results of wellhead pressure simulation on injection wells with different properties of the injected agent

Плотность нагнетаемой воды, кг/м ³ Injected water density, kg/m ³	Давление на устье нагнетательной скважины, МПа Pressure at the mouth of the injection well, MPa						
	1	2	3	4	5	6	7
1188	20,82	19,45	18,14	18,04	17,98	17,97	17,96
1215	20,81	19,40	18,07	17,96	17,90	17,89	17,88
1255	20,8	19,34	17,94	17,84	17,78	17,77	17,76

При анализе полученных значений устьевых давлений по рассматриваемым скважинам очевид-

но, что в результате изменения свойств воды, направляемой в систему поддержания пластового давления, расчетные значения устьевых давлений значительно изменяются. Наибольшее изменение наблюдается на скважинах 3–7 ввиду наибольшей протяженности высоконапорной линии. На данных скважинах изменение устьевого давления составляет 0,2 МПа. При этом, рассчитав среднее значение устьевых давлений для каждого из рассмотренных вариантов, отметим, что различие между этими параметрами составляет 0,16 МПа.

При подробном анализе полученных результатов, с учетом преимуществ нагнетательных скважин и длины водопроводов, авторами предлагается номограмма, позволяющая оценить влияние степени изменения свойств воды, направляемой в систему поддержания пластового давления, на погрешность в проведении гидравлических расчетов. Учет длины водопровода и преимуществ нагнетательных скважин выражается в использовании параметра потерь давления от источника до скважины. Для уточнения данной номограммы дополнительно выполнены гидравлические расчеты для трех различных систем поддержания пластового давления с известной геометрией труб, технологическими параметрами и свойствами воды. Затем проводился расчет при увеличении и уменьшении плотности, оценивалось изменение давления в конце трубопровода. В результате получено, что изменение плотности оказывает влияние на потери давления на трение, это данные нанесены на номограмму. Результаты обработки полученных данных представлены на рис. 2.

На номограмме приведен способ работы с ней: по известному изменению плотности (70 кг/м³) необходимо провести вертикальную линию до потерь давления на трение в рассматриваемом трубопроводе, после чего построить горизонталь влево до оси «Y» и определить, что погрешность гидравлических испытаний составляет 0,141 МПа. Полученное значение – погрешности выполнения гидравлических расчетов.

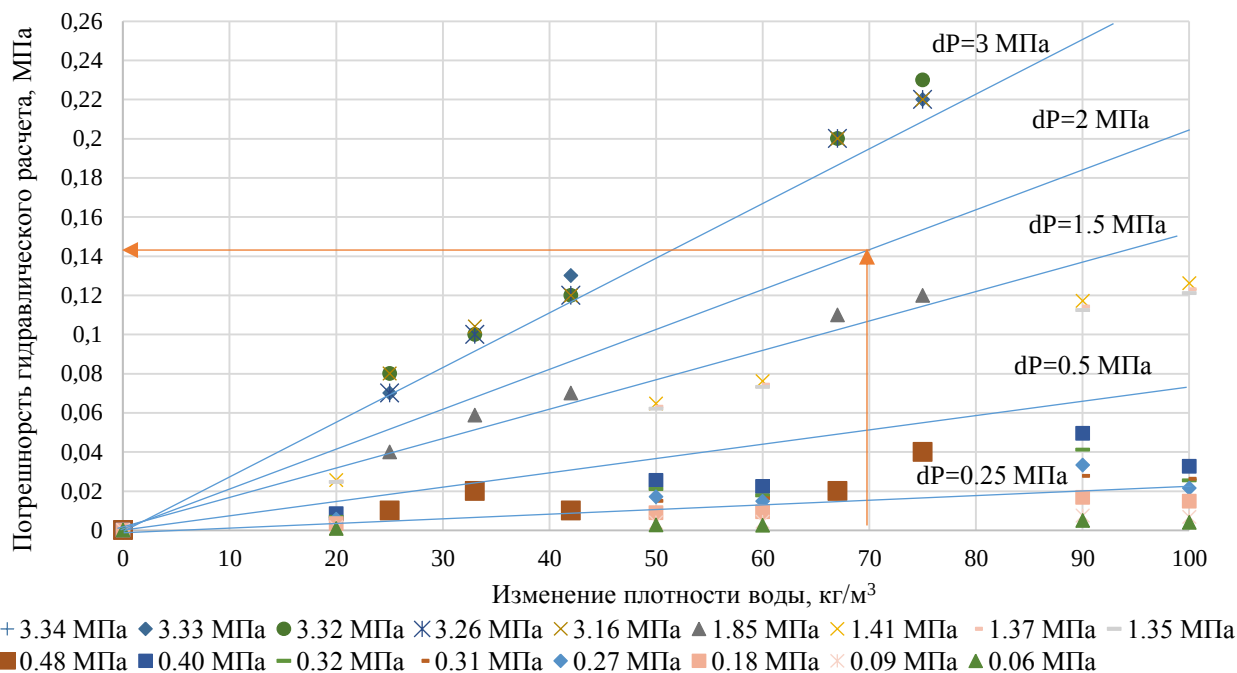


Рис. 2. Номограмма для определения погрешности выполнения гидравлического расчета при наличии неопределенности промысловых данных

Fig. 2. Nomogram for determining the error in hydraulic calculation with field data uncertainty

Анализируя данную номограмму, отметим, что изменение плотности жидкости на рассматриваемой системе транспорта составляет 67 кг/м^3 , при этом средняя потеря давления на трение в рассматриваемых трубопроводах составляет 2,45 МПа. В результате применения данной номограммы можно сделать заключение, что допустимая погрешность при проведении гидравлических расчетов составит 0,15 МПа.

Применение данной номограммы позволит быстро и без необходимости проведения множества исследований определить, с какой точностью могут быть выполнены гидравлические расчеты при наличии динамически изменяющихся свойств нагнетаемого агента.

Заключение

Внедрение цифровых технологий существенно повышает эффективность нефтедобычи и транспортировки нефти. Однако большинство моделей в

ходе расчётов не могут учесть все возникающие осложнения в реальных промысловых условиях. Добыча нефти на месторождениях, находящихся на заключительных стадиях разработки, существенно осложняется за счёт ухудшения качества и увеличения обводненности добываемой продукции. Это приводит к значительному изменению свойств попутно добываемой воды. Данные обстоятельства могут существенно влиять на точность гидравлических расчётов. Согласно анализу полученных результатов, среднее изменение устьевое давления на семи скважинах с учётом изменения свойств воды составило 0,16 МПа, что превышает допустимую погрешность 0,15 МПа. В результате можно заключить, что при моделировании работы системы поддержания пластового давления необходимо учитывать изменения состава, минерализации и Ph попутно добываемой воды.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ilyushin P.Y., Vyatkin K.A., Kozlov A.V. Investigation of rheological properties of oil during the formation of wax deposits // Results in Engineering. – 2022. – Vol. 14. – P. 100434.
2. Nurgalieva K.S., Saychenko L.A., Riazi M. Improving the efficiency of oil and gas wells complicated by the formation of Asphalt–Resin–Paraffin deposits // Energies. – 2021. – Vol. 14. – № 20. – P. 6673.
3. Турдиев Ш.Ш.У., Комилов Б.А.У., Раббимов Ж.Ш. Анализ текущего состояния и проблемы разработки подгазовых нефтяных залежей // Universum: технические науки. – 2022. – № 11-3 (104). – С. 58–62.
4. Dmitrievskiy A.N., Eremin N.A., Stolyarov V.E. Digital transformation of gas production // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – Vol. 700. – № 1. – P. 012052.
5. Dmitrievsky A.N., Eremin N.A., Stolyarov V.E. On the issue of the application of wireless decisions and technologies in the digital oil and gas production // Actual problems of oil and gas. – 2019. – № 2 (25). – P. 11.

6. New advancements, challenges, and future needs on treatment of oilfield produced water: a state-of-the-art review / S. Ghafoori, M. Omar, N. Koutahzadeh, S. Zendezboudi, R.N. Malhas, M. Mohamed, S. Al-Zubaidi, K. Redha, F. Baraki, M. Mehrvar // *Separation and Purification Technology*. – 2022. – Vol. 289. – P. 120652.
7. Khader E.H., Mohammed T.J., Mirghaffari N. Removal of organic pollutants from produced water by batch adsorption treatment // *Clean Technologies and Environmental Policy*. – 2022. – Vol. 24. – № 2. – P. 713–720.
8. Advanced oxidation processes in the removal of organic substances from produced water: Potential, configurations, and research needs / M. Cocha, G. Farinelli, A. Tiraferri, M. Minella, D. Vione // *Chemical Engineering Journal*. – 2021. – Vol. 414. – P. 128668.
9. A review of treatment technologies for produced water in offshore oil and gas fields / Y. Liu, H. Lu, Y. Li, H. Xu, Z. Pan, P. Dai, H. Wang, Q. Yang // *Science of the Total Environment*. – 2021. – Vol. 775. – P. 145485.
10. Salem F., Thiemann T. Produced water from oil and gas exploration—problems, solutions and opportunities // *Journal of Water Resource and Protection*. – 2022. – Vol. 14. – № 2. – P. 142–185.
11. The role of membrane-based technologies in environmental treatment and reuse of produced water / E. Zolghadr, M.D. Firouzjaei, G. Amouzandeh, P. le Clair, M. Elliott // *Frontiers in Environmental Science*. – 2021. – Vol. 9. – P. 71.
12. Purification of produced water using oscillatory membrane filtration / A. Ullah, K. Shahzada, S.W. Khan, V. Starov // *Desalination*. – 2020. – Vol. 491. – P. 114428.
13. Calcium sulfate risk assessment throughout the injection and production system / T. Chen, Q. Wang, F.A. Alrasheed, N.A. Aljeaban // *The Aramco Journal of Technology*. – 2023. – P. 2–9. URL: <https://www.aramco.com/-/media/publications/jot/2023/2023-jot-summer-additional-article-14.pdf> (дата обращения: 20.06.2023).
14. Bioelectrochemical system as an innovative technology for treatment of produced water from oil and gas industry: a review / J. Cabrera, M. Irfan, Y. Dai, P. Zhang, Y. Zong, X. Liu // *Chemosphere*. – 2021. – Vol. 285. – P. 131428.
15. Ilyushin P.Y., Vyatkin K.A., Kozlov A.V. Development of a digital well management system // *Applied System Innovation*. – 2023. – Vol. 6. – № 1. – P. 31.
16. Assessment of prospects and directions of digital transformation of oil and gas companies / A.S. Flaksman, D.I. Kokurin, D.K. Khodzhaev, M.A. Ekaterinovskaya, O.V. Orusova, A.V. Vlasov // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2020. – Vol. 976. – № 1. – P. 012036.
17. Digital twin for the oil and gas industry: overview, research trends, opportunities, and challenges / T.R. Wanasinghe, L. Wroblewski, B.K. Petersen, R.G. Gosine, L.A. James, O. De Silva, G.K.I. Mann, P.J. Warrian // *IEEE access*. – 2020. – Vol. 8. – P. 104175–104197.
18. A digital twin-based approach for optimization and prediction of oil and gas production / F. Shen, S.S. Ren, X.Y. Zhang, H.W. Luo, C.M. Feng // *Mathematical Problems in Engineering*. – 2021. – Vol. 2021. – P. 1–8.
19. Digital twin for oil pipeline risk estimation using prognostic and machine learning techniques / E.B. Priyanka, S. Thangavel, X. Gao, N.S. Sivakumar // *Journal of industrial information Integration*. – 2022. – Vol. 26. – P. 100272.
20. Ilyushin P.Y., Vyatkin K.A., Kozlov A.V. Development and verification of a software module for predicting the distribution of wax deposition in an oil well based on laboratory studies // *Results in Engineering*. – 2022. – Vol. 16. – P. 100697.
21. Инженерный симулятор технологических процессов // Агентство по технологическому развитию. URL: <https://atr.gov.ru/tech/750745477971> (дата обращения: 10.06.2023)
22. Одельский Э.Х. Гидравлический расчет трубопроводов разного назначения. – Минск: Вышэйш. школа, 1961. – 103 с.
23. Андриасов Р.С. Справочное руководство по проектированию разработки и эксплуатации нефтяных месторождений. Добыча нефти. – М.: Недра, 1983. – 455 с.
24. Александров А.А. Таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара: справочник. ГСССД Р-776-98. – М.: Физматент, 2003. – 164 с.

Информация об авторах

Павел Юрьевич Илюшин, кандидат технических наук, доцент кафедры нефтегазовых технологий Пермского национального исследовательского политехнического университета, Россия, 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29. ilushin-pavel@yandex.ru

Кирилл Андреевич Вяткин, аспирант кафедры нефтегазовых технологий Пермского национального исследовательского политехнического университета, Россия, 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29. kirill.vyatkin@girngm.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3464-1493>

Антон Вадимович Козлов, аспирант кафедры нефтегазовых технологий Пермского национального исследовательского политехнического университета, Россия, 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29. anton.kozlov@girngm.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2350-2153>

Поступила в редакцию: 18.09.2023

Поступила после рецензирования: 25.12.2023

Принята к публикации: 24.05.2024

REFERENCES

1. Ilyushin P.Y., Vyatkin K.A., Kozlov A.V. Investigation of rheological properties of oil during the formation of wax deposits. *Results in Engineering*, 2022, vol. 14, pp. 100434.
2. Nurgalieva K.S., Saychenko L.A., Riazzi M. Improving the efficiency of oil and gas wells complicated by the formation of Asphalt–Resin–Paraffin deposits. *Energies*, 2021, vol. 14, no. 20, pp. 6673.

3. Turdiev S.S.U., Komilov B.A.U., Rabimov Z.S. Analysis of the current state and problems of development of sub-gas oil deposits. *Universum: technical sciences*, 2022, no. 11-3 (104), pp. 58–62. (In Russ.)
4. Dmitrievskiy A.N., Eremin N.A., Stolyarov V.E. Digital transformation of gas production. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, vol. 700, no. 1, pp. 012052.
5. Dmitrievskiy A.N., Eremin N.A., Stolyarov V.E. On the issue of the application of wireless decisions and technologies in the digital oil and gas production. *Actual problems of oil and gas*, 2019, no. 2 (25), pp. 11.
6. Ghafoori S., Omar M., Koutahzadeh N., Zendezboudi S., Malhas R.N., Mohamed M., Al-Zubaidi S., Redha K., Baraki F., Mehrvar M. New advancements, challenges, and future needs on treatment of oilfield produced water: a state-of-the-art review. *Separation and Purification Technology*, 2022, vol. 289, pp. 120652.
7. Khader E.H., Mohammed T.J., Mirghaffari N. Removal of organic pollutants from produced water by batch adsorption treatment. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 2022, vol. 24, no. 2, pp. 713–720.
8. Coia M., Farinelli G., Tiraferri A., Minella M., Vione D. Advanced oxidation processes in the removal of organic substances from produced water: production, configurations, and research needs. *Chemical Engineering Journal*, 2021, vol. 414, pp. 128668.
9. Liu Y., Lu H., Li Y., Xu H., Pan Z., Dai P., Wang H., Yang Q. A review of treatment technologies for produced water in offshore oil and gas fields. *Science of the Total Environment*, 2021, vol. 775, pp. 145485.
10. Salem F., Thiemann T. Produced water from oil and gas exploration – problems, solutions and opportunities. *Journal of Water Resource and Protection*, 2022, vol. 14, no. 2, pp. 142–185.
11. Zolghadr E., Firouzjaei M.D., Amouzandeh G., LeClair P., Elliott M. The role of membrane-based technologies in environmental treatment and reuse of produced water. *Frontiers in Environmental Science*, 2021, vol. 9, pp. 71.
12. Ullah A., Shahzada K., Khan S.W., Starov V. Purification of produced water using oscillatory membrane filtration. *Desalination*, 2020, vol. 491, pp. 114428.
13. Chen T., Wang Q., Alrasheed F.A., Aljeaban N.A. Calcium Sulfate Risk Assessment throughout the Injection and Production System. *The Aramco Journal of Technology*, 2023, pp. 2–9. Available at: <https://www.aramco.com/-/media/publications/jot/2023/2023-jot-summer-additional-article-14.pdf> (accessed 20 June 2023).
14. Cabrera J., Irfan M., Dai Y., Zhang P., Zong Y., Liu X. Bioelectrochemical system as an innovative technology for treatment of produced water from oil and gas industry: a review. *Chemosphere*, 2021, vol. 285, pp. 131428.
15. Ilyushin P.Y., Vyatkin K.A., Kozlov A.V. Development of a digital well management system. *Applied System Innovation*, 2023, vol. 6, pp. 31.
16. Flaksman A.S., Kokurin D.I., Khodzhaev D.K., Ekaterinovskaya M.A., Orusova O.V., Vlasov A.V. Assessment of prospects and directions of digital transformation of oil and gas companies. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, vol. 976, no. 1, pp. 012036.
17. Wanasinghe T.R., Wroblewski L., Petersen B.K., Gosine R.G., James L.A., De Silva O., Mann G.K.I., Warrian P.J. Digital twin for the oil and gas industry: overview, research trends, opportunities, and challenges. *IEEE access*, 2020, vol. 8, pp. 104175–104197.
18. Shen F., Ren S.S., Zhang X.Y., Luo H.W., Feng C.M. A digital twin-based approach for optimization and prediction of oil and gas production. *Mathematical Problems in Engineering*, 2021, vol. 2021, pp. 1–8.
19. Priyanka E.B., Thangavel S., Gao X., Sivakumar N.S. Digital twin for oil pipeline risk estimation using prognostic and machine learning techniques. *Journal of industrial information Integration*, 2022, vol. 26, pp. 100272.
20. Ilyushin P.Y., Vyatkin K.A., Kozlov A.V. Development and verification of a software module for predicting the distribution of wax deposition in an oil well based on laboratory studies. *Results in Engineering*, 2022, vol. 16, pp. 100697.
21. Engineering simulator of technological processes. *Agency for Technological Development*. (In Russ.) Available at: <https://atr.gov.ru/tech/750745477971> (accessed 10 June 2023).
22. Odelskiy E.H. *Hydraulic calculation of pipelines for various purposes*. Minsk, Vysshaya shkola Publ., 1961. 103 p. (In Russ.)
23. Andriasov R.S. *Reference guide for the design development and operation of oil fields. Oil production*. Moscow, Nedra Publ., 1983. 455 p. (In Russ.)
24. Aleksandrov A.A. *Tables of thermophysical properties of water and water vapor: reference*. GSSSD R-776-98. Moscow, Fizmatent Publ., 2003. 164 p. (In Russ.)

Information about the authors

Pavel Yu. Ilyushin, Cand. Sc., Associate Professor, Perm National Research Polytechnic University, 29, Komsomolskiy avenue, Perm, 614990, Russian Federation. ilushin-pavel@yandex.ru

Kirill A. Vyatkin, Postgraduate Student, Perm National Research Polytechnic University, 29, Komsomolskiy avenue, Perm, 614990, Russian Federation. kirill.vyatkin@girngm.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3464-1493>

Anton V. Kozlov, Postgraduate Student, Perm National Research Polytechnic University, 29, Komsomolskiy avenue, Perm, 614990, Russian Federation. anton.kozlov@girngm.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2350-2153>

Received: 18.09.2023

Revised: 25.12.2023

Accepted: 24.05.2024

УДК 622.322

DOI: 10.18799/24131830/2024/8/4370

Шифр специальности ВАК: 2.5.21

Оценка напряжений на поверхности эксплуатационных колонн, оснащенных противопесочными фильтрами, при спуске в горизонтальную скважину

М.Я. Хабибуллин✉

Уфимский государственный нефтяной технический университет (филиал в г. Октябрьский),
Россия, г. Октябрьский

✉ m-hab@mail.ru

Аннотация. *Актуальность* исследования обусловлена необходимостью оценить время накопления пластового песка у кольцевого пространства горизонтальной скважины и единичную длину фильтроэлементов в составе низа эксплуатационных колонн и определить напряжения на поверхности эксплуатационных колонн, оснащенных противопесочными фильтрами, при спуске в скважину. *Цель:* на основе изучения причин продолжающегося поступления песка в скважины, оснащенные противопесочными фильтрами, разработать и предложить мероприятия, связанные с необходимостью выбора уменьшения количества фильтров, обеспечивающих проектный дебит горизонтальной скважины, или существенным увеличением длины фильтрующей поверхности фильтров с целью снижения эрозийного износа проволоочной обмотки. *Объекты.* Скважина с горизонтальным участком, оснащенная противопесочными фильтрами, одноразмерными с обсадными колоннами. Предполагалось сохранение целостности поверхности фильтроэлементов и исключение условий их разрушения в процессе спуска в горизонтальный ствол. Что предполагает собой необходимую эффективную работу скважины в течение всего эксплуатационного периода. Рассматривается участок первого набора кривизны и усилия, возникающие при этом, а также устойчивость колонны труб при возможных её остановках. По длине колонны равномерно расположены центраторы, на некоторых участках будем иметь многопролетную статически неопределимую балку, в каждом сечении которой действует радиальная нагрузка. *Методы.* При исследовании времени накопления пластового песка в кольцевом пространстве горизонтальной скважины и единичной длины фильтроэлементов в составе низа эксплуатационных колонн необходимо на первом этапе определить напряжения на поверхности эксплуатационных колонн, оснащенных противопесочными фильтрами, при спуске в скважину. Особый интерес представляет собой исследование оценки времени существования переходного периода, иначе говоря, в течение какого эксплуатационного срока происходит полное накопление пластового песка в кольцевом пространстве и переход дренирования пласта по всей длине горизонтального ствола к дренированию только зон, примыкающих к фильтрам. Для расчета дебита жидкости при полном заполнении песком кольцевого пространства горизонтальной скважины использованы проектные величины параметров пласта АС_{4.8}. Максимальное значение депрессий, используемых в расчетах, принято равным 1,5 МПа. *Результаты.* Рассмотрение ситуаций, возникающих при спуске фильтров в горизонтальные скважины, свидетельствует о том, что внешняя поверхность фильтроэлементов не защищена от разрушения в результате контактных напряжений со стенками пробуренного ствола скважины. Для защиты от разрушения и затирания открытых зазоров глиносодержащими породами по краям фильтроэлементов должны устанавливаться жесткие центраторы, максимально допустимые расстояния между которыми не должны превышать 4,0–4,5 м.

Ключевые слова: противопесочный фильтр, горизонтальная скважина, профилированная проволока, межвитковый зазор, суммарный прогиб, сила сопротивления

Для цитирования: Хабибуллин М.Я. Оценка напряжений на поверхности эксплуатационных колонн, оснащенных противопесочными фильтрами, при спуске в горизонтальную скважину // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 8. – С. 56–67. DOI: 10.18799/24131830/2024/8/4370

UDC 622.322

DOI: 10.18799/24131830/2024/8/4370

Evaluation of stresses on the surface of production columns equipped with sand filters when downing into a horizontal well

M.Ya. Khabibullin✉

Ufa State Petroleum Technological University (branch in Oktyabrsky), Oktyabrsky, Russian Federation

✉m-hab@mail.ru

Abstract. Relevance. The need to estimate the time of formation sand accumulation near the annulus of a horizontal well and the unit length of filter elements in the bottom of production strings and to determine the stresses on the surface of production strings equipped with sand filters when lowering into the well. **Aim.** Based on a study of the reasons for the continued flow of sand into wells equipped with anti-sand filters, to develop and propose measures related to the need to choose a reduction in the number of filters that provide the design flow rate of a horizontal well or a significant increase in the length of the filtering surface of the filters in order to reduce erosive wear of the wire winding. **Objects.** A well with a horizontal section, equipped with sand filters, the same size as the casing strings. It was assumed that the integrity of the surface of the filter elements would be preserved and the conditions for their destruction would be eliminated when lowering into the horizontal shaft. This presupposes the necessary efficient operation of the well throughout the entire operational period. The section of the first set of curvature and the forces arising during this are considered as well as stability of a pipe string during possible stops. Centralizers are evenly located along the length of the column, then in some sections we will have a multi-span statically indeterminate beam, in each section of which a radial load acts. **Methods.** When studying the time of formation sand accumulation in the annular space of a horizontal well and a unit length of filter elements in the bottom of production strings, it is necessary at the first stage to determine the stresses on the surface of production strings equipped with sand filters when lowering into the well. Studying the assessment of the existence time of the transition period is of particular interest. This is, in other words, during what operational period there is a complete accumulation of formation sand in the annular space and the transition of formation drainage along the entire length of the horizontal wellbore to drainage of only zones adjacent to the filters. To calculate the fluid flow rate when the annular space of the horizontal well is completely filled with sand, the design values of the $AC_{4.8}$ formation parameters were used. The maximum value of depressions used in the calculations is assumed to be 1.5 MPa. **Results.** Consideration of situations that arise when filters are lowered into horizontal wells indicates that the outer surface of the filter elements is not protected from destruction as a result of contact stresses with the walls of the drilled wellbore. To protect against destruction and rubbing open gaps by clay-containing rocks, rigid centralizers should be installed along the edges of the filter elements, the maximum allowable distances between which should not exceed 4.0–4.5 m.

Keywords: anti-sand filter, horizontal well, profiled wire, interturn gap, total deflection, drag force

For citation: Khabibullin M.Ya. Evaluation of stresses on the surface of production columns equipped with sand filters when downing into a horizontal well. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 8, pp. 56–67. DOI: 10.18799/24131830/2024/8/4370

Введение

При оценке времени накопления пластового песка в кольцевом пространстве горизонтальной скважины и единичной длины фильтроэлементов в составе низа эксплуатационных колонн необходимо на первом этапе определить напряжения на поверхности эксплуатационных колонн, оснащенных противопесочными фильтрами, при спуске в скважину [1–3].

Как известно, основные причины продолжающегося поступления песка в скважины, оснащенные противопесочными фильтрами [4–7]:

1. Неправильный выбор размера межвитковых зазоров фильтров, отличающихся от рекомендаций авторитетных исследователей в области

нефтедобычи, вследствие отсутствия или не представительности данных по гранулометрическому составу пород пласта вдоль зоны экранирования. Увеличение удельной нагрузки (объемной скорости жидкости и газа) на поверхности фильтроэлементов и, как следствие, их разрушение из-за:

- кольматации части ее поверхности глинистыми составляющими пород или асфальтено-смолистыми соединениями нефти в процессе добычи;
 - низкой величины скважности.
2. Длительный период времени работы скважины без достаточной гравийной обсыпки по пери-

метру фильтроэлементов, приводящий к их эрозионному разрушению.

3. Недостаточная устойчивость материала фильтроэлементов к эрозионно-коррозионному износу в период эксплуатации.

Очевидно, что данный перечень охватывает эксплуатационные факторы работы скважин и конструктивные параметры противопесочных фильтров, что и определило характер планируемых работ по поиску причин их разрушения.

Методы и материалы

Программой проведения работ по определению причин пескования скважин предусматривалось исследование гранулометрического состава проб песка и количество взвешенных частиц (КВЧ) из скважин, расположенных в различных зонах пласта АС₄₋₈ с различными сроками эксплуатации, включая начальный этап и период освоения после бурения [8, 9].

Отбор проб и гранулометрический анализ песка проведены по 11 скважинам, в том числе по 3 скважинам с межвитковыми зазорами фильтров 0,3 мм и 8 скважинам с межвитковыми зазорами 0,15 мм, основные эксплуатационные параметры которых показаны в табл. 1.

Независимо от дебитов жидкости, разброс значений которых находится в интервале от 11 до 359 м³/сут., и времени, прошедшего с начала эксплуатации, повсеместно отмечается вынос крупных фракций песка [10, 11].

Исходя из эффекта сводообразования, наиболее устойчивые своды, а следовательно, эффективное предотвращение выноса песка из приствольной зоны скважин, обеспечивается частицами песка, медианный диаметр которых превышает половину ширины щели фильтра [12–14].

Таким образом, прогнозное состояние противопесочных фильтров, находящихся в эксплуатации более трех месяцев, характеризуется разрушением профилированной проволоки с существенным увеличением межвитковых зазоров [15, 16].

Однако степень разрушения фильтроэлементов с различными межвитковыми зазорами, в сопоставимый период эксплуатации может быть разной.

Строительство горизонтальных скважин (ГС), вскрывающих слабосцементированные продуктивные горизонты, предполагает, как правило, оснащение горизонтальных участков противопесочными фильтрами, одноразмерными с обсадными колоннами [17–19].

В этой связи сохранение целостности поверхности фильтроэлементов и исключение условий их разрушения в процессе спуска в горизонтальный ствол представляет собой необходимую эффективную работу скважины в течение всего эксплуатационного периода.

На примере ГС пласта АС₄₋₈ Федоровского месторождения рассмотрим силы, которые возникают на поверхности обсадных труб и фильтров при спуске в ГС [20, 21].

Проектная глубина скважины включает в себя направление диаметром 324 мм, глубиной 100 м; кондуктора диаметром 245 мм, длиной 750 м; участка первого набора кривизны $i=1,5^\circ/10$ м с отметки 1100 м по вертикали; 146-мм эксплуатационной колонны, которая имеет интервал стабилизации примерно до отметки 1856 м по вертикали; двух (или одного) участков набора кривизны при входе в горизонтальный пласт с интенсивностями соответственно $6^\circ/10$ м и $3,5^\circ/10$ м с отметок 2082 и 2274 м по длине колонны (рис. 1).

Таблица 1. Эксплуатационные параметры с различными зазорами фильтров

Table 1. Operating parameters with different filter gaps

Куст Bush	№ скв. Well no.	Дата ввода в эксплуатацию Commissioning date	Контактная зона Contact zone	Дебит нефти, м ³ /сут. Oil flow rate, m ³ /day	Дебит жидкости, м ³ /сут. Liquid flow rate, m ³ /day	Вода, % Water, %	Дата отбора проб/квч, мг/л Sampling date/kvh, mg/l	Размер щели, мм Crack size, mm
458	5021	21.03.1998	НГВ	125,7	197	30,1	2000/388; 2001/320	0,3
431	5089	19.08.1998	НГ	77	138	38,9	2000/406; 2001/214	0,3
607	5430	31.01.2000	НВ	0,33	359	99,9	2000/823,5; 2001/301; 2002/115,3	0,3
572	5373	17.09.2001	НВ	37	70	42,1	22.01.2002/60,87	0,15
567	5481	24.09.2001	НГВ	61	116	42,4	23.01.2002/31,3	0,15
567	5487	31.08.2001	НГВ	36,4	76	47,6	23.01.2002/62,8	0,15
645	5520	13.09.2001	НГВ	4,3	11	57,7	23.01.2002/52,525	0,15
645	5526	19.10.2001	НГВ	7,8	11	22,6	24.01.2002/28,31	0,15
645	5527	04.09.2001	НГВ	9,7	12	11,4	24.01.2002/22,27	0,15
649	5533	30.06.2002	НГВ	72	155	46,4	03.07.2002/180	0,15
580	5566	09.06.2002	НГВ	27	107	25,2	02.07.2002/214	0,15

Примечание. НВ – зона «нефть–вода»; НГ – зона «нефть–газ»; НГВ – зона «нефть–газ–вода».

Note. НВ – "oil–water" zone; НГ – "oil–gas" zone; НГВ – "oil–gas–water" zone.

Отклонение от вертикали составляет 634–640 м, длина горизонтального участка $L=544\text{--}550$ м. Горизонтальный участок оборудован фильтрами ФГС-146/6000 и центраторами ЦПЖ-146 [22–24].

Рассмотрим участок первого набора кривизны и действующие усилия (рис. 2). Выделим элемент колонны dS и рассмотрим действующие силы: $T(\alpha)$ – усилие сжатия колонны; qdS – вес элемента колонны; dS – элемент дуги колонны; q – вес длины погонного метра; dF – элемент силы сопротивления; dN – нормальная составляющая веса участка dS .

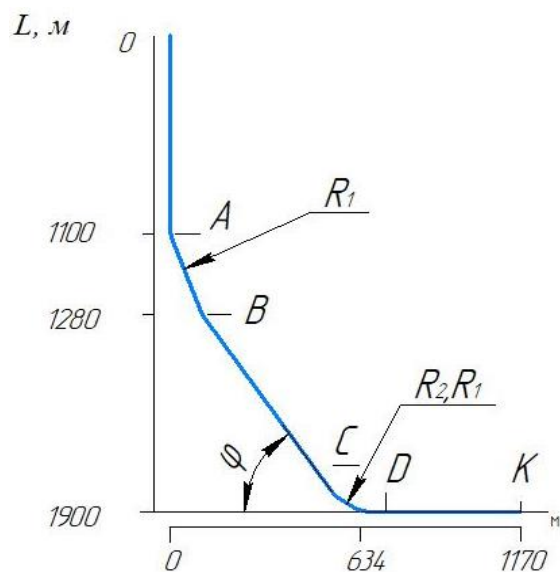


Рис. 1. Схема конструкции горизонтальной скважины Федоровского месторождения

Fig. 1. Design scheme of a horizontal well of the Fedorovskoe field

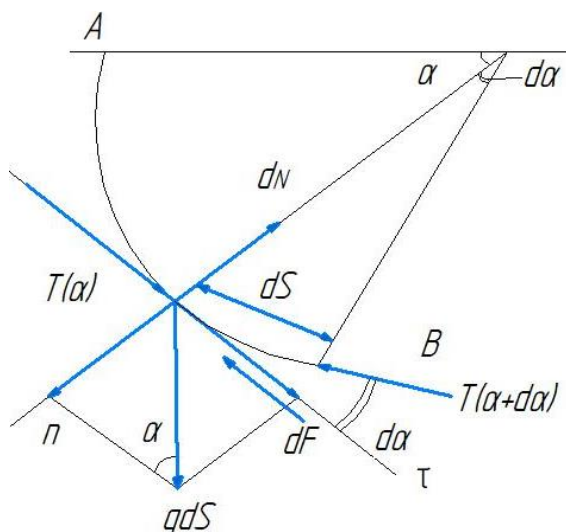


Рис. 2. Силы, действующие на элемент колонны при спуске

Fig. 2. Forces acting on the column element during descent

Выпишем проекции сил на касательную τ и нормаль n согласно формуле (1) [25]:

$$\left. \begin{aligned} T(\alpha) - T(\alpha + d\alpha) + qdS \cos \alpha - df &= 0 \\ dN - qdS \sin \alpha - T(\alpha + d\alpha)d\alpha &= 0 \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

где α – текущий угол по горизонтали; $d\alpha$ – приращение угла α ; f – коэффициент трения труб; R – радиус кривизны.

Переходя к пределу $d\alpha \rightarrow 0$ из уравнения (1), получаем дифференциальное уравнение по выражению (2):

$$T' - fT + qRf \sin \alpha - qR \cos \alpha = 0. \quad (2)$$

С учетом коэффициента трения труб $f=0,3$ и в качестве начального условия предположим, что в конечной точке набора кривизны B сила сопротивления $T=0$ (при $\alpha=\pi/6$). В результате получим решение (2) в виде уравнения (3)

$$T(\alpha) = qR(0,83 \sin \alpha - 0,550 \cos \alpha + 0,377e^{0,3\alpha}). \quad (3)$$

Для 146-мм колонны $q=28$ кг/м, а радиус кривизны $R=382$ м. Максимальное значение силы сопротивления будет в точке A согласно формуле (4)

$$T(A) = -19,6 \text{ кН}, \quad (4)$$

где знак минус указывает, что сила сопротивления противоположна движению колонны.

Уравнение (3) позволяет найти сопротивление в произвольной точке колонны в зоне набора кривизны.

Очевидно, что максимальная сила сопротивления возникает в момент достижения колонной забоя горизонтального участка ГС [26].

На наклонном участке BC (рис. 1) длиной примерно $L=900$ м

$$F_2 = -qfL \sin \varphi,$$

где f – коэффициент сопротивления; φ – угол наклона к горизонтали, принимаемый $35\text{--}45^\circ$. Тогда $F=-5350$ кг.

Примем для расчетов на участке CD радиус кривизны $R_2=94$ м (для интенсивности искривления $6^\circ/0$ м), а угол $\alpha_1=15^\circ$. Тогда на данном участке $F_3=-2,09$ кН.

И, наконец, на участке DK

$$F_4 = -fL_{CK}q = -45,7 \text{ кН}.$$

Итого суммарное сопротивление составит примерно $F_c=120$ кН.

Таким образом, возникающие силы сопротивления на участках AB и CD могут привести к разгрузке колонны, а следовательно, к потере устойчивости и дополнительным прогибам. При этом высота разгруженной части может достигать 100 м и более [27].

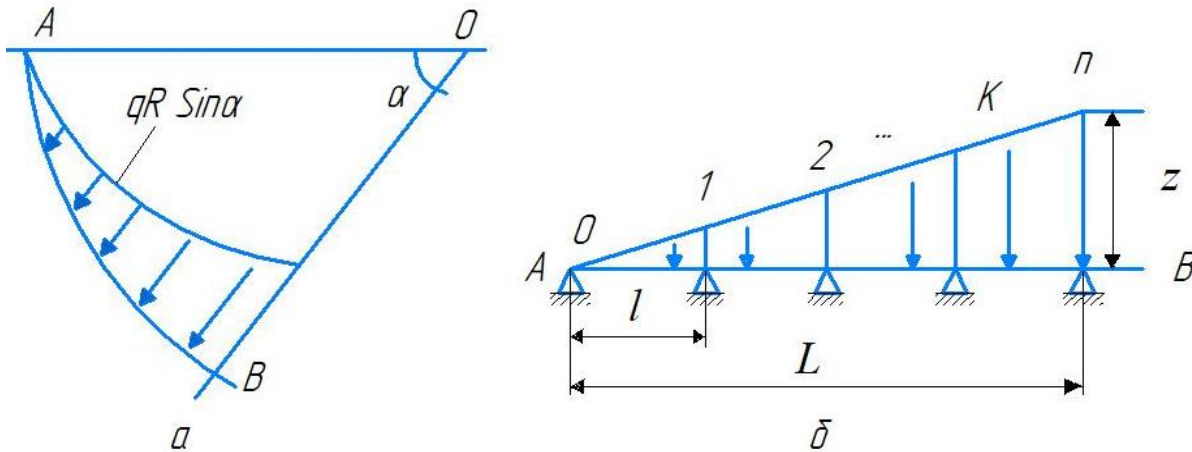


Рис. 3. Схема перехода от радиальной к треугольной нагрузке

Fig. 3. Scheme of transition from radial to triangular load

Рассмотрим устойчивость колонны труб при возможных остановках в сечениях B и D . Если считать, что по длине колонны равномерно расположены центраторы, то на участке AB будем иметь многопролетную статически неопределимую балку, в каждом сечении которой действует радиальная нагрузка dp , которая определяется по формуле (5):

$$dp = qdS \sin \alpha, \quad (5)$$

и касательная $dQ = qdS \cos \alpha$.

Полную радиальную нагрузку P можно определить интегрированием уравнения (5) в пределах α от 0 до $\pi/6$ ($p=0,134 qR$).

При большом радиусе кривизны $R > 200$ м колонну на отрезке кривизны AB длиной $\pi/6$ (рис. 3, а) можно рассматривать как прямую круглую балку, нагруженную неравномерно распределенной нагрузкой $q_\alpha = \frac{dP}{d\alpha} = qR \sin \alpha$ (эквивалентная треугольная нагрузка на рис. 3, б).

Данный переход позволяет получить нижние оценки изгибающих моментов и прогибов по сравнению с изогнутой колонной [28]. Для эквивалентности нагрузок необходимо, чтобы площадь треугольной нагрузки равнялась синусоидальной нагрузке $p=0,134 qR$, т. е. максимальное значение треугольной нагрузки было равно $\chi = \frac{2P}{L}$.

Балка равнопролетная, и, принимая расстояния между пролетами равными λ , получаем формулу (6)

$$\chi = \frac{2P}{n\lambda}, \quad (6)$$

где n – число пролетов.

Переименуем опоры балки 0, 1, 2, ..., k , $n-1$, n и запишем уравнение трех моментов [29], согласно формуле (7)

$$M_k + 4M_{k+1} + M_{k+2} = \frac{P\lambda(k+1)}{n^2} \quad (7)$$

при начальных и граничных условиях по формуле (8):

$$M_0 = M_n = 0. \quad (8)$$

Решая задачу (5) операционным методом с учетом (6), находим изгибающий момент по формуле (9)

$$M_k = \frac{P\lambda}{n^3} \left[\frac{k}{n} - (-1)^{n+k} \frac{\text{sh} \gamma k}{\text{ch} \gamma n} \right], \quad (9)$$

где k принимает значения 0, 1, 2, ..., n , а параметр $\gamma = \lambda n(2 + \sqrt{3}) = 1,317$.

Подставляя значения $p=0,134 qR$, $\lambda = \frac{L}{n}$ и $\gamma=1,317$ из (7) получаем изгибающий момент согласно формуле (10)

$$M_k = -\frac{0,134qRL}{n^4} \left[\frac{k}{n} - (-1)^{n+k} \frac{\text{sh} 1,317k}{\text{ch} 1,317n} \right]. \quad (10)$$

Расчеты по формуле (9) опорных и изгибающих моментов для каждого пролета позволили установить, что прогиб от суммарного момента при числе центраторов $n=25$ достигает значения порядка $3 \cdot 10^{-3}$ см, а прогиб от сплошной нагрузки [30] на предпоследнем пролете (23 и 24) равен

$$f_q = \frac{5}{384} \frac{q\lambda^4}{EI} = \frac{5}{384} \frac{7,6 \cdot 10^{-2} \cdot 8^4 \cdot (10^2)^4}{2 \cdot 10^6 \cdot 993,2} \approx 0,2 \text{ см.}$$

Суммарный прогиб в этом случае обеспечивает безопасную проходимость колонны в зоне набора кривизны. Однако при прохождении этой зоны трубы имеют естественный прогиб, и необходимо

рассмотреть устойчивость данного участка (пролет 23–24) от действия продольных сил.

При рассмотрении трех последних труб с фильтрами в зоне набора кривизны (рис. 4) естественный прогиб $f_c = R \left(1 - \cos \frac{\alpha_2}{2} \right)$, где α_2 определяется для трех пролетов по формуле $\alpha_2 = \frac{360 \cdot (3\lambda)}{2\pi K} \approx 3,6^\circ$, следовательно $f_c = 15,3$ см.

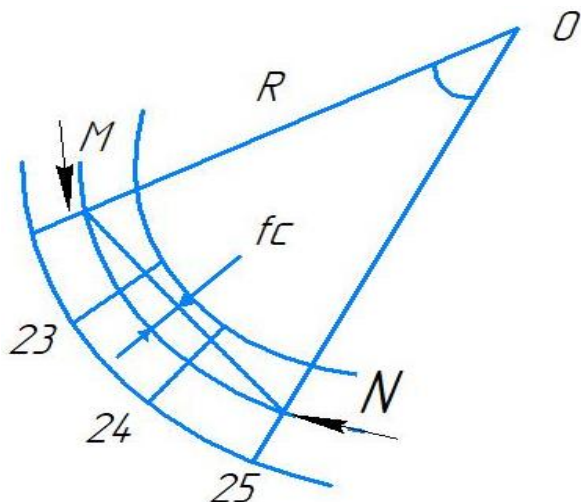


Рис. 4. Схема действия продольных сил на низ колонны
 Fig. 4. Scheme of the action of longitudinal forces on the bottom of the column

Критическая сила $P_{кр}$ определяется по формуле (11):

$$P_{кр} = \eta \frac{EI}{(3\lambda)^2}, \quad (11)$$

где η – коэффициент, зависящий от типа расстановки центраторов.

Для случая равномерной расстановки $\eta = 81,27$ [31].

Тогда

$$P_{кр} = 81,27 \frac{2 \cdot 10^6 \cdot 993,2}{24^2 \cdot 100^2} = 282,2 \text{ кН.}$$

Продольная сила принимается равной весу изогнутой части в проекции на касательную

$$N = qR \int_0^{\frac{\pi}{6}} \cos \alpha d\alpha = 0,5qR \approx 53,5 \text{ кН.}$$

Дополнительный прогиб составит [32]

$$f_{доп} = \frac{f_0 N}{P_{кр} - N} = \frac{15,3 \cdot 5350}{28200 - 5350} = 3,6 \text{ см.}$$

Суммарный прогиб будет равен $f \approx 3,8$ см, что меньше зазора в межтрубном пространстве. Следовательно, начальная часть колонны в фильтровой зоне должна быть оборудована центраторами с расстояниями 4–5 м. В этом случае дополнительный прогиб составит всего 0,5 см, а прогиб от распределенной нагрузки станет близким к нулю.

Количество фильтров играет существенную роль только после завершения переходного этапа, когда каждый фильтр переходит как бы в режим перфорированного участка и дренирует область пласта, непосредственно примыкающую к фильтру [33].

В связи с этим особый интерес представляет собой оценка времени существования переходного периода, иначе говоря, в течение какого эксплуатационного срока происходит полное накопление пластового песка в кольцевом пространстве и переход дренирования пласта по всей длине горизонтального ствола к дренированию только зон, примыкающих к фильтрам [34–36].

В табл. 2 выборочно представлены горизонтальные скважины с длинами стволов от 400 до 592 м, оснащенные двумя фильтрами, с линейной плотностью расстановки 1 фильтр на 200 м и 1 фильтр на 300 м длины ствола, что в 2–3 раза меньше ранее рекомендованной плотности расстановки фильтров.

Для расчета дебита жидкости при полном заполнении песком кольцевого пространства ГС использованы проектные величины параметров пласта АС₄₋₈. Максимальное значение депрессий, используемых в расчетах, принято равным 1,5 МПа [37, 38].

Сопоставление фактических и расчетных дебитов жидкости показывает многократное превышение реально добываемой продукции в сравнении с расчетной не зависимо от срока эксплуатации скважин [39].

Это означает, что за весь длительный период эксплуатации, достигающий, например, по скважине № 4 куст 329Б 92 месяца, не наступает полного заполнения песком кольцевого пространства, дренирование пласта происходит по большей части длины горизонтального ствола скважины, а поступающая в скважину жидкость свободно перемещается в кольцевом пространстве.

Вместе с тем уменьшение общей длины фильтрующей поверхности фильтроэлементов по сравнению с расчетной означает и одновременное увеличение фильтрационной нагрузки на единицу поверхности фильтроэлемента, а учитывая неполное покрытие его пластовым материалом, и высокую вероятность эрозийного износа фильтров в процессе эксплуатации [40–42].

Таблица 2. Сопоставление фактических и расчетных дебитов жидкости в горизонтальных скважинах

Table 2. Comparison of actual and calculated fluid rates in horizontal wells

№ куста Bush no.	№ скв. Well no.	Длина горизонтального ствола, м Horizontal trunk length, m	Время эксплуатации, мес. Operating time, months	Дебит нефти, т/сут. Oil flow rate, t/day	Дебит жидкости, м³/сут. Liquid flow rate, m³/day	Расчетный дебит жидкости, м³/сут. Estimated liquid flow rate, m³/day
329Б	4	462	92	21,2	187	31,6
560	5441	527	17	15,9	132	38,3
561	5444	527	17	30,8	163	38,4
561	5449	519	17	20,3	105	34,0
605	5417	551	24	37,8	229	40,2
605	5423	385	27	48,7	119	29,3
605	5428	553	24	22,7	138	39,9
607	5432	561	19	43,8	49,7	43,0
608	5429	408	19	140,1	193	29,3
609	5427	551	22	18,3	24	38,4
613	5443	565	11	33,5	66	39,6
616	5453	544	12	52,4	125	38,4
617	5462	578	10	108,2	150	40,0
618	5463	471	11	126,1	157	32,0
619	5466	550	9	85,9	148	38,4
620	5470	517	9	45,3	190	34,0
634	5939	550	7	11,9	137	39,9
635	5483	380	4	11,4	100	28,0
635	5944	550	12	30,8	60	39,9
637	5485	562	9	166	190	40,0
639	5491	580	9	83,3	100	40,6
639	5497	524	6	23,9	29	39,0
639	5505	400	8	23,9	125	29,0
639	5507	579	9	113,5	138	39,7
640	5494	592	7	11,9	52	39,9
640	5496	260	6	95,6	120	25,4
640	5504	560	9	21,5	86	39,2
640	5506	560	8	47,9	60	39,2
640	5512	450	5	30,2	99	31,6
607	5430	559	7	4,6	318	39,0

Таким образом, существует необходимость выбора между уменьшением количества фильтров, обеспечивающих проектный дебит горизонтальной скважины, и существенным увеличением длины фильтрующей поверхности фильтров с целью снижения эрозионного износа проволоочной обмотки и предотвращения или минимизации разрушения коллектора в течение эксплуатационного периода [43–45].

В этой связи представляется целесообразным увеличение количества фильтров из расчета 6 м фильтрующей поверхности на 50 м длины ствола, что в два раза превышает ранее рекомендованную линейную плотность расстановки фильтроэлементов (1 фильтр на 100 м ствола) [46].

Естественно, что данные условия применимы в случае ожидаемого равномерного притока по длине горизонтального ствола.

При изучении работ, выполненных сотрудниками института СургутНИПИнефть, выявлено, что данные о неравномерности притока жидкости вдоль горизонтального ствола при неизменной депрессии, связанной с изменением эффективных нефтенасыщенных толщин и фильтрационных характеристик пласта вдоль профиля ствола, наличия слабопроницаемых разделов и др. [47–49]. Поэтому большая часть фильтров должна располагаться в зоне повышенных притоков, а меньшая – там, где ожидаемые притоки жидкости из пласта существенно меньше.

Следуя вышеизложенному, целесообразно размещать фильтры пропорционально величинам притока, т. е. если ожидаемый приток на данном участке составляет 2/3 общего притока, то и количество фильтров, размещенных на этом участке, должно составлять 2/3 от общего их числа [50].

При анализе теоретических зависимостей, связывающих дебит горизонтальной скважины, обсаженной фильтрами в продуктивной части пласта, с общей протяженностью фильтроэлементов, количеством и длиной отдельных участков размещения фильтров вдоль горизонтального ствола, показывает, что после полного заполнения кольцевого пространства пластовым песком поступление пластовых флюидов в скважину происходит только в зонах, непосредственно примыкающих к фильтроэлементам. При этом для условий пласта АС₄₋₈ с точки зрения улучшения условий фильтрации и максимального охвата всего горизонтального ствола дренированием рациональное число участков расположения фильтроэлементов должно быть не менее 10, а линейная плотность размещения – 6 м фильтроэлементов на 100 м длины ствола [51–53].

Этим условиям для длины горизонтальных стволов в диапазоне 300–600 м отвечают компоновки фильтров, состоящие из 1,5 и 3 м фильтроэлементов.

Между тем в реальных условиях эксплуатации ГС пласта АС₄₋₈, как показано ранее, не происходит полного заполнения кольцевого пространства пластовым песком, в результате чего жидкость, поступающая из пласта, может свободно перемещаться по каналам в кольцевом пространстве к фильтрам, расположенным в любом интервале горизонтального ствола.

Учитывая, что пропускная способность 1 погонного метра фильтроэлемента с наружным диаметром 165 мм, обсыпанного гравием, при перепаде давления 1 кг/см² составляет ~250 л/мин., даже один фильтр длиной 6 м обладает многократным запасом производительности в сравнении с потен-

циальным дебитом ГС, и, следовательно, с этой точки зрения нет необходимости строгой регламентации единичной длины фильтроэлемента в рамках используемой в настоящее время в ОАО «Сургут-нефтегаз» противопесочной технологии [54, 55].

Заключение

Таким образом, рассмотрение ситуаций, возникающих при спуске фильтров в ГС, свидетельствует о том, что внешняя поверхность фильтроэлементов не защищена от разрушения в результате кон-

тактных напряжений со стенками пробуренного ствола скважины.

Для защиты от разрушения и затирания открытых зазоров глинодержащими породами по краям фильтроэлементов должны устанавливаться жесткие центраторы, максимально допустимые расстояния между которыми не должны превышать 4,0–4,5 м, при этом допустимые максимальные нагрузки обсадной колонны при спуске в ГС составляют:

- на участках набора кривизны – 40–50 кН;
- на участке горизонтального ствола – 100–120 кН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Казымов Ш.П., Ахмед Фариз. Опыт и перспективы применения скважинных фильтров с устройствами регулирования притока // SOCAR Proceedings. – 2015. – № 2. – С. 32–40. DOI: 10.5510/OGP20150200240.
2. Махниченко А.С., Сизов Р.А., Сизов Н.П. Влияние правильного подбора гравийных фильтров в нефтяной скважине на эффективность отбора флюида // Актуальные проблемы современной когнитивной науки. – 2020. – С. 33–36.
3. Behnia M., Seifabad M.C. Stability analysis and optimization of the support system of an underground powerhouse cavern considering rock mass variability // Environmental Earth Sciences. – 2018. – Vol. 77. – № 18. – P. 354–362.
4. Lu H., Kim E., Gutierrez M. Monte Carlo simulation (MCS)-based uncertainty analysis of rock mass quality Q in underground construction // Tunneling and Underground Space Technology. – 2019. – Vol. 94. – № 5. – P. 278–284.
5. Хабибуллин М.Я. Исследование процессов, происходящих в колонне труб при устьевой импульсной закачке жидкости в скважину // Нефтегазовое дело. – 2018. – Т. 16. – № 6. – С. 34–39. DOI: 10.17122/ngdelo-2018-6-34-39.
6. A probabilistic assessment of the casing integrity in a pre-salt wellbore / P.A.L.P. Firme, F.L.G. Pereira, D. Roehl, C. Romanel // 50th US Rock Mechanics Geomechanics Symposium. – USA, Houston, 2016. – Vol. 3. – P. 2555–2564.
7. Aregbe A.G. Wellbore stability problems in deepwater gas wells // World Journal of Engineering and Technology. – 2017. – Vol. 05. – № 04. – P. 626–647.
8. Zhang J., Lu Y. Study on temperature distribution of ultra-deep wellbore and its effect on mechanical properties of surrounding rock // Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering. – 2019. – Vol. 38. – P. 2831–2839.
9. Manshad A., Jalalifar H., Aslannejad M. Analysis of vertical, horizontal and deviated wellbores stability by analytical and numerical methods // Journal of Petroleum Exploration and Production Technology. – 2014. – Vol. 4. – P. 359–369.
10. Хабибуллин М.Я., Сулейманов Р.И. Повышение надежности сварных соединений трубопроводов в системе поддержания пластового давления // Нефтегазовое дело. – 2019. – Т. 17. – № 5. – С. 93–98. DOI: 10.17122/ngdelo-2019-5-93-98
11. Рогов Е.А. Исследование проницаемости призабойной зоны скважин при воздействии технологическими жидкостями // Записки Горного института. – 2020. – Т. 242. – С. 169–173. DOI: 10.31897/PMI.2020.2.169
12. Case study of a novel acid-diversion technique in carbonate reservoirs, Canada / F.F. Chang, T. Love, C.J. Affeld, J.B. Blevins, R.L. Thomas, D.K. Fu // Annual Technical Journal and Exhibition. – 2021. – Vol. 11. – P. 37–48.
13. Paccaloni G., Tambini M. Advances in matrix stimulation technology, Canada // Journal of petroleum technology. – 2022. – Vol. 121. – P. 457–458.
14. Paccaloni G. A new, effective matrix stimulation diversion technique, Texas // Journal of Drilling&Completion. – 2022. – Vol. 12. – P. 77–89.
15. Lian Zhanghua, Luo Zeli, Yu Hao. Assessing the strength of casing pipes that contain corrosion pit defects // Journal of Southwest Petroleum University. – 2018. – Vol. 40. – № 2. – P. 86–94.
16. Хабибуллин М.Я. Совершенствование процесса солянокислотной обработки скважин применением новейших технологий и оборудования // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 10. – С. 128–134. DOI: 10.18799/24131830/2020/10/2861
17. Хэнян Ван, Подгорнов В.М. Проектирование мест расположения термокомпенсаторов для предотвращения деформации многослойных фильтров в горизонтальном стволе паронагнетательной скважины // Газовая Промышленность. – 2019. – № 4. – С. 38–44.
18. Кашников Ю.А., Ашихмин С.Г., Кухтинский А.Э. О связи коэффициентов трещиностойкости и геофизических характеристик горных пород месторождений углеводородов // Записки Горного института. – 2020. – Т. 241. – С. 83–90. DOI: 10.31897/PMI.2020.1.83
19. Ахмад Ф.Ф., Гайбалыев Г.Г. Интенсификации притока нефти путём изоляции притоков воды в призабойной зоне // Scientific Petroleum. – 2022. – № 2. – С. 23–27.
20. Лятифов Я.А. Нестационарное воздействие термоактивной полимерной композицией для глубинного выравнивания профиля фильтрации // Scientific Petroleum. – 2021. – № 1. – С. 25–30.
21. Хабибуллин М.Я. Увеличение эффективности разделения жидких систем при сборе пластовой жидкости // Нефтегазовое дело. – 2020. – Т. 18. – № 2. – С. 64–71. DOI: 10.17122/ngdelo-2020-2-64-71
22. Ван Хэнян, Подгорнов В.М., Мо Цзяли. Экспериментальные исследования эффективности фильтрующих элементов забойных фильтров в потоке высоковязкой нефти // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2022. – № 01. – С. 43–47.
23. Senashov S.I., Savostyanova I.L., Cherepanova O.N. Numerical-and-analytic method for solving cauchy problem of one-dimensional gas dynamics // Journal of Siberian federal University. Mathematics and physics. – 2022. – Vol. 15 (4). – P. 444–449. DOI: 10.17516/1997-1397-2022-15-4-444-449.

24. Кантюков Р.Р., Запечалов Д.Н., Вагапов Р.К. Анализ применения и воздействия углекислотных сред на коррозионное состояние нефтегазовых объектов // Записки Горного института. – 2021. – Т. 250. – № 4. – С. 578–586.
25. Khabibullin M.Ya., Suleimanov R.I. Automatic packer reliability prediction under pulsed transient flooding of hydrocarbon reservoirs // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Novosibirsk. – 2019. – P. 012024. DOI: 10.1088/1757-899X/560/1/012024.
26. Case history of a challenging thin oil column Extended Reach Drilling (ERD) development at Sakhalin / V.P. Gupta, S.R. Sanford, R.S. Mathis, E.K. Dipippo, M.J. Egan // Paper SPE/IADC. – 2013. – Vol. 12. – P. 163487.
27. Helmy M.W. Application of new technology in the completion of ERD wells // Sakhalin-1 Development. Paper SPE. – 2006. – Vol. 8. – P. 103587.
28. Suleimanov R.I., Khabibullin M.Ya., Suleimanov R.I. Analysis of the reliability of the power cable of an electric-centrifugal pump unit // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. International Conference on Innovations and Prospects of Development of Mining Machinery and Electrical Engineering 2019. – 2019. – P. 012054. DOI: 10.1088/1755-1315/378/1/012054
29. Hossain M.E., AlMejed A.A. Fundamental of sustainable drilling engineering. – Chichester: Scrivener Publ. LLC, 2015. – 786 p.
30. Vagapov R.K. Resistance of steels under operating conditions of gas fields containing aggressive CO₂ in the produced media // Inorganic Materials: Applied Research. – 2022. – Vol. 13. – № 1. – P. 240–245.
31. Successful optimization strategies combine to deliver significant performance boost at the edge of the ERD envelope / R.W. James, P.J. Pastusek, G.R. Kuhn, A.F. Andreev, J.R. Bailey, L.W. Wang // Sakhalin Island. Russia. Paper SPE. San Diego. – 2012. – Vol. 9. – P. 150959.
32. Khabibullin M.Ya. 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». – 2019. – P. 042012. DOI: 10.1088/1742-6596/1333/4/042012
33. New rotary shouldered connection expands the capability of world record ERD operation / S.R. Sanford, M.W. Walker, J.N. Brock, M.J. Jellison, A.F. Muradov // Paper SPE/ IADC. Fort Worth. – 2014. – Vol. 5. – P. 168049.
34. Schamp J.H., Estes B.L., Keller S.R. Torque reduction techniques in ERD wells // Paper SPE/IADC. Miami. – 2006. – Vol. 14. – P. 98969.
35. Третьяк А.А., Савенок О.В., Швеи В.В. Скважинные фильтры. – Новочеркасск: Колорит, 2019. – 227 с.
36. Successful implementation of hydraulic fracturing techniques in high permeability heavy oil wells in the Llanos Basin-Colombia / J.I. Bahamon, C.E. Garcia, M.J. Ulloa, J.H. Leal // Ecopetrol SPE. Weatherford. – 2015. – Vol. 54. – P. 136425.
37. Galimullin M.L., Khabibullin M.Ya. Experience with sucker-rod plunger pumps and the latest technology for repair of such pumps // Chemical and Petroleum Engineering. – 2020. – Vol. 55. – № 11–12. – P. 896–901. DOI: 10.1007/s10556-020-00710-1
38. Вагапов Р.К. Сравнение и интерпретация результатов обработки данных внутритрубной диагностики для условий транспортировки коррозионно-агрессивного газа // Дефектоскопия. – 2021. – № 8. – С. 62–71.
39. Запечалов Д.Н., Вагапов Р.К., Михалкина О.К. Влияние пластовых условий на коррозионную агрессивность среды и защиту от внутренней коррозии на объектах добычи газа // Научно-технический сборник. Вести газовой науки. – 2021. – № 2. – С. 177–189.
40. Khabibullin M.Ya. Theoretical grounding and controlling optimal parameters for water flooding tests in field pipelines // Journal of Physics: Conference Series. International Conference «Information Technologies in Business and Industry». – 2019. – P. 042013. DOI: 10.1088/1742-6596/1333/4/042013
41. Швеи С.В., Кейн С.А. Перспективы применения метода спуска обсадных колонн с облегчённым нижним участком // Электронный научный журнал «Ресурсы Европейского Севера. Технологии и экономика освоения». – 2015. – № 2. – С. 81–90.
42. Хабибуллин М.Я. Метод термокислотного импульсирования для увеличения нефтеотдачи // Нефтегазовое дело. – 2020. – Т. 18. – № 4. – С. 58–64. DOI: 10.17122/ngdelo-2020-4-58-64.
43. Karim A., Du C., Hansson G. Influence of exposure to 980 nm laser radiation on the luminescence of Si: Er/O light-emitting diodes // Journal of applied physics. – 2008. – Vol. 12. – P. 123110. URL: <http://dx.doi.org/10.1063/1.3050316> (дата обращения: 15.07.2022).
44. The next generation of Sakhalin extended-reach drilling / R.I. Viktorin, J.K. McDermott, R.C. Rush, J.L. Schamp // Paper SPE/IADC. Miami. – 2006. – Vol. 3. – P. 99131.
45. 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». 4 – Mechatronics, Robotics and Electrical Drives. – 2019. – P. 052012. DOI: 10.1088/1742-6596/1333/5/052012
46. Walker M.W. Pushing the Extended Reach Envelope at Sakhalin: an operator's experience drilling a record reach well // Paper SPE/IADC. San Diego. – 2012. – Vol. 9. – P. 151046.
47. Walker M.W., Veselka A., Harris S.A. Increasing Sakhalin Extended Reach Drilling and completion capability // Paper SPE/IADC. Amsterdam. – 2009. – Vol. 4. – P. 119373.
48. CFD simulation study of shelf and tube heat exchangers with different baffle segment configurations / A.S. Ambekar, R.H. Sivakumar, N.A. Anantharaman, M.D. Vivekenandan // Applied Thermal Engineering. – 2016. – Vol. 108. – P. 999–1007.
49. Вагапов Р.К., Томский И.С. Зависимость скорости коррозионных процессов от скорости потока среды с содержанием диоксида углерода // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2021. – № 6. – С. 37–40.
50. Monoethylene glycol reclamation based on chemical precipitation process / H. Rahimi, A. Ghafelebash, K. Shams, M.C. Amiri // Journal of Natural Gas Science and Engineering. – 2021. – Vol. 92. – Art. 103993.
51. Ван Хэнян, Подгорнов В.М. Скин-фактор композиционного забойного фильтра // Строительство скважин нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2020. – № 3. – С. 26–31. DOI: 10.33285/0130-3872-2020-4(328)-26-31
52. Fluid flow with compaction and sand production in unconsolidated sandstone reservoir / Y.A. Xiong, H.J. Xu, Y.D. Wang, W.R. Zhou, C.E. Liu, L.J. Wang // Petroleum. – 2018. – Vol. 4. – Iss. 3. – P. 358–363.

53. Vagapov R.K., Zapevalov D.N. Corrosion activity of operating conditions for the steel equipment and pipelines in the plants extracting CO₂-containing gases // *Metallurgist*. – 2021. – Vol. 65. – P. 50–61.
54. Разработка дизайна фильтра-хвостовика для крепления горизонтальных участков большой длины / С.А. Кейн, И.Н. Андронов, С.В. Швец, В.П. Пятибрат // *Инженер-нефтяник*. – 2016. – № 1. – С. 24–28.
55. Automated evaluation of hole cleaning efficiency while drilling improves rate of penetration / M. Al-Rubaii, R. Gajbhiye, A. Al-Yami, M. Alshalan, M. Al-Awami // *International Petroleum Technology Conference: Materials of IPTC*. – Dhahran, Kingdom of Saudi Arabia, 2020.

Информация об авторах

Марат Яхиевич Хабибуллин, кандидат технических наук, доцент кафедры нефтепромысловых машин и оборудования, Институт нефти и газа Уфимского государственного нефтяного технического университета (филиал в г. Октябрьский), Россия, 452607, г. Октябрьский, ул. Девонская, 54а. m-hab@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2565-0088>

Поступила в редакцию: 04.09.2023

Поступила после рецензирования: 25.09.2023

Принята к публикации: 24.05.2024

REFERENCES

1. Kazymov Sh.P., Ahmed Fariz. Experience and prospects for the use of well filters with inflow control devices. *SOCAR Proceedings*, 2015, no. 2, pp. 32–40. (In Russ.) DOI: 10.5510/OGP20150200240.
2. Makhnickenko A.S., Sisov R.A., Sisov N.P. The influence of the correct selection of gravel filters in the oil well on the efficiency of fluid extraction. *Topical problems of modern cognitive science. Collection of articles*, 2020, pp. 33–36. (In Russ.)
3. Behnia M., Seifabad M.C. Stability analysis and optimization of the support system of an underground powerhouse cavern considering rock mass variability. *Environmental Earth Sciences*, 2018, vol. 77, no. 18, pp. 354–362.
4. Lu H., Kim E., Gutierrez M. Monte Carlo simulation (MCS)-based uncertainty analysis of rock mass quality Q in underground construction. *Tunneling and Underground Space Technology*, 2019, vol. 94, no. 5, pp. 278–284.
5. Khabibullin M.Ya. Investigation of the processes occurring in the pipe string during the wellhead pulsed injection of fluid into the well. *Neftgazovoe delo*, 2018, vol. 16, no. 6, pp. 34–39. (In Russ.) DOI: 10.17122/ngdelo-2018-6-34-39.
6. Firme P.A.L.P., Pereira F.L.G., Roehl D., Romanel C. A probabilistic assessment of the casing integrity in a Pre-salt wellbore. *50th US Rock Mechanics Geomechanics Symposium*. USA, Houston, 2016. Vol. 3, pp. 2555–2564.
7. Aregbe A.G. Wellbore stability problems in deepwater gas wells. *World Journal of Engineering and Technology*, 2017, vol. 05, no. 04, pp. 626–647.
8. Zhang J., Lu Y. Study on temperature distribution of ultra-deep wellbore and its effect on mechanical properties of surrounding rock. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2019, vol. 38, pp. 2831–2839.
9. Manshad A., Jalalifar H., Aslannejad M. Analysis of vertical, horizontal and deviated wellbores stability by analytical and numerical methods. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 2014, vol. 4, pp. 359–369.
10. Khabibullin M.Ya., Suleimanov R.I. Improving the reliability of pipeline welded joints in the reservoir pressure maintenance system. *Oil and Gas Business*, 2019, vol. 17, no. 5, pp. 93–98. (In Russ.) DOI: 10.17122/ngdelo-2019-5-93-98
11. Rogov E.A. Investigation of the permeability of the bottomhole zone of wells under the influence of process fluids. *Zapiski Gornogo instituta*, 2020, vol. 242, pp. 169–173. (In Russ.) DOI: 10.31897/PMI.2020.2.169.
12. Chang F.F., Love T., Affeld C.J., Blevins J.B., Thomas R.L., Fu D.K. Case study of a novel acid-diversion technique in carbonate reservoirs. *Annual Technical Journal and Exhibition*, 2021, vol. 11, pp. 37–48.
13. Paccaloni G., Tambini M. Advances in matrix stimulation technology. *Journal of petroleum technology*, 2022, vol. 121, pp. 457–458.
14. Paccaloni G. A new, effective matrix stimulation diversion technique. *Journal of Drilling & Completion*, 2022, vol. 12, pp. 77–89.
15. Lian Zhanghua, Luo Zeli, Yu Hao. Assessing the strength of casing pipes that contain corrosion pit defects. *Journal of Southwest Petroleum University*, 2018, vol. 40, no. 2, pp. 86–94.
16. Khabibullin M.Ya. Improving the process of hydrochloric acid treatment of wells using the latest technologies and equipment. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 10, pp. 128–134. (In Russ.) DOI: 10.18799/24131830/2020/10/2861.
17. Henyang Wang, Podgornov V.M. Designing locations for thermal compensators to prevent deformation of multilayer filters in a horizontal wellbore of a steam injection well. *Gas industry*, 2019, no. 4, pp. 38–44. (In Russ.)
18. Kashnikov Yu.A., Ashikhmin S.G., Kukhtinsky A.E. On the relationship between crack resistance coefficients and geophysical characteristics of rocks of hydrocarbon deposits. *Zapiski Gornogo instituta*, 2020, vol. 241, pp. 83–90. (In Russ.) DOI: 10.31897/PMI.2020.1.83.
19. Akhmad F. F., Gaibalyev G. G. Intensification of oil inflow by isolating water inflows in the bottomhole zone. *Scientific Petroleum*, 2022, no. 2, pp. 23–27. (In Russ.)
20. Lyatifov Ya.A. Non-stationary exposure to a thermoactivated polymer composition for deep leveling of the filtration profile. *Scientific Petroleum*, 2021, no. 1, pp. 25–30. (In Russ.)
21. Khabibullin M.Ya. Increasing the efficiency of separation of liquid systems during the collection of reservoir fluid. *Oil and gas business*, 2020, vol. 18, no. 2, pp. 64–71. (In Russ.) DOI: 10.17122/ngdelo-2020-2-64-71.
22. Wang Henyang, Podgornov V.M., Mo Jiyali. Experimental studies of the efficiency of downhole filter elements in a high-viscosity oil flow. *Construction of oil and gas wells on land and at sea*, 2022, no. 01, pp. 43–47. (In Russ.)

23. Senashov S.I., Savostyanova I.L., Cherepanova O.N. Numerical-and-analytic method for solving cauchy problem of one-dimensional gas dynamics. *Journal of Siberian federal University. Mathematics and physics*, 2022, vol. 15 (4), P. 444–449. DOI: 10.17516/1997-1397-2022-15-4-444-449.
24. Kantyukov R.R., Zapevalov D.N., Vagapov R.K. Analysis of the use and impact of carbon dioxide environments on the corrosion state of oil and gas facilities. *Notes of the Mining Institute*, 2021, vol. 250, no. 4, pp. 578–586. (In Russ.)
25. Khabibullin M.Ya., Suleimanov R.I. Automatic packer reliability prediction under pulsed transient flooding of hydrocarbon reservoirs. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Novosibirsk, 2019, pp. 012024. DOI: 10.1088/1757-899X/560/1/012024.
26. Gupta V.P., Sanford S.R., Mathis R.S., Dipippo E.K., Egan M.J. Case history of a challenging thin oil column Extended Reach Drilling (ERD) development at Sakhalin. *Paper SPE/IADC*, 2013, vol. 12, pp. 163487.
27. Helmy M.W. Application of new technology in the completion of ERD wells. *Sakhalin-1 Development. Paper S.P.E.*, 2006, vol. 8, pp. 103587.
28. Suleimanov R.I., Khabibullin M.Ya., Suleimanov Re.I. Analysis of the reliability of the power cable of an electric-centrifugal pump unit. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. International Conference on Innovations and Prospects of Development of Mining Machinery and Electrical Engineering* 2019, 2019, pp. 012054. DOI: 10.1088/1755-1315/378/1/012054
29. Hossain M.E., AlMejed A.A. *Fundamental of sustainable drilling engineering*. Chichester, Scrivener Publ. LLC, 2015. 786 p.
30. Vagapov R.K. Resistance of steels under operating conditions of gas fields containing aggressive CO₂ in the produced media. *Inorganic Materials: Applied Research*, 2022, vol. 13, no. 1, pp. 240–245.
31. James R.W., Pastusek P.J., Kuhn G.R., Andreev A.F., Bailey J.R., Wang L.W. Successful Optimization strategies combine to deliver significant performance boost at the edge of the ERD envelope. *Sakhalin Island. Russia. Paper S.P.E. San Diego*, 2012, vol. 9, pp. 150959.
32. Khabibullin M.Ya. 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»*, 2019, pp. 042012. DOI: 10.1088/1742-6596/1333/4/042012
33. Sanford S.R., Walker M.W., Brock J.N., Jellison M.J., Muradov A.F. New rotary shouldered connection expands the capability of world record ERD operation. *Paper SPE/IADC. Fort Worth*, 2014, vol. 5, pp. 168049.
34. Schamp J.H., Estes B.L., Keller S.R. Torque reduction techniques in ERD wells. *Paper SPE/IADC. Miami*, 2006, vol. 14, pp. 98969.
35. Tretyak A.A., Savenok O.V., Shvets V.V. *Downhole filters*. Novochoerkassk, Kolorit Publ., 2019. 227 p. (In Russ.)
36. Bahamon J.I., Garcia C.E., Ulloa M.J., Leal J.H. Successful implementation of hydraulic fracturing techniques in high permeability heavy oil wells in the Llanos Basin-Colombia. *Ecopetrol SPE. Weatherford*, 2015, vol. 54, pp. 136425.
37. Galimullin M.L., Khabibullin M.Ya. Experience with sucker-rod plunger pumps and the latest technology for repair of such pumps. *Chemical and Petroleum Engineering*, 2020, vol. 55, no. 11–12, pp. 896–901. DOI: 10.1007/s10556-020-00710-1
38. Vagapov R.K. Comparison and interpretation of the results of processing in-line diagnostic data for the conditions of transportation of corrosive gas. *Defectoscopy*, 2021, no. 8, pp. 62–71. (In Russ.)
39. Zapevalov D.N., Vagapov R.K., Mikhalkina O.K. The influence of reservoir conditions on the corrosive aggressiveness of the environment and protection against internal corrosion at gas production facilities. Scientific and technical collection. *News of gas science*, 2021, no. 2, pp. 177–189. (In Russ.)
40. Khabibullin M. Ya. Theoretical grounding and controlling optimal parameters for water flooding tests in field pipelines. *Journal of Physics: Conference Series. International Conference «Information Technologies in Business and Industry»*, 2019, pp. 042013. DOI: 10.1088/1742-6596/1333/4/042013
41. Shvets S.V., Kane S.A. Prospects for using the method of running casing strings with a lightweight lower section. *Electronic scientific journal «Resources of the European North. Technologies and economics of development»*, 2015, no. 2, pp. 81–90. (In Russ.)
42. Khabibullin M.Ya. The method of thermal acid pulse for increasing oil recovery. *Oil and gas business*, 2020, vol. 18, no. 4, pp. 58–64. (In Russ.) DOI: 10.17122/ngdelo-2020-4-58-64.
43. Karim A., Du C., Hansson G. Influence of exposure to 980 nm laser radiation on the luminescence of Si: Er/O light-emitting diodes. *Journal of applied physics*, 2008, vol. 12, pp. 123110. Available at: <http://dx.doi.org/10.1063/1.3050316> (accessed 15 July 2022).
44. Viktorin R.I., McDermott J.K., Rush R.C., Schamp J.L. The next generation of Sakhalin Extended-Reach Drilling. *Paper SPE/IADC. Miami*, 2006, vol. 3, pp. 99131.
45. 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». 4 – Mechatronics, Robotics and Electrical Drives*, 2019, pp. 052012. DOI: 10.1088/1742-6596/1333/5/052012.
46. Walker M.W. Pushing the Extended Reach Envelope at Sakhalin: an operator's experience drilling a record reach well. *Paper SPE/IADC. San Diego*, 2012, vol. 9, pp. 151046.
47. Walker M.W., Veselka A., Harris S.A. Increasing Sakhalin Extended Reach Drilling and completion capability. *Paper SPE/IADC. Amsterdam*, 2009, vol. 4, pp. 119373.
48. Ambekar A.S., Sivakumar R.H., Anantharaman N.A., Vivekenandan M.D. CFD simulation study of shelf and tube heat exchangers with different baffle segment configurations. *Applied Thermal Engineering*, 2016, vol. 108, pp. 999–1007.
49. Vagapov R.K., Tomskey I.S. Dependence of the rate of corrosion processes on the flow rate of a medium containing carbon dioxide. *Chemical and oil and gas engineering*, 2021, no. 6, pp. 37–40. (In Russ.)
50. Rahimi H., Ghafelebash A., Shams K., Amiri M.C. Monoethylene glycol reclamation based on chemical precipitation process. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2021, vol. 92, Art. 103993.
51. Wang Hanyang, Podgornov V.M. Skin factor of a composite downhole filter. *Construction of wells for oil and gas wells on land and at sea*, 2020, no. 3, pp. 26–31. (In Russ.) DOI: 10.33285/0130-3872-2020-4(328)-26-31.

52. Xiong Y.A., Xu H.J., Wang Y.D., Zhou W.R., Liu C.E., Wang L.J. Fluid flow with compaction and sand production in unconsolidated sandstone reservoir. *Petroleum*, 2018, vol. 4, Iss. 3, pp. 358–363.
53. Vagapov R.K., Zapevalov D.N. Corrosion activity of operating conditions for the steel equipment and pipelines in the plants extracting CO₂-containing gases. *Metallurgist*, 2021, vol. 65, pp. 50–61.
54. Kane S.A., Andronov I.N., Shvets S.V., Pyatibrat V.P. Design development of a liner filter for fastening long horizontal sections. *Petroleum Engineer*, 2016, no. 1, pp. 24–28. (In Russ.)
55. Al-Rubaii M., Gajbhiye R., Al-Yami A., Alshalan M., Al-Awami M. Automated evaluation of hole cleaning efficiency while drilling improves rate of penetration. *International Petroleum Technology Conference. Materials of IPTC*. Dhahran, Kingdom of Saudi Arabia, 2020.

Information about the authors

Marat Ya. Khabibullin, Cand. Sc., Associate Professor, Ufa State Petroleum Technological University (branch in Oktyabrsky), 54a, Devonskaya street, Oktyabrsky, 452607, Russian Federation. m-hab@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2565-0088>

Received: 04.09.2023

Revised: 25.09.2023

Accepted: 24.05.2024

УДК 622.822.22

DOI: 10.18799/24131830/2024/8/4418

Шифр специальности ВАК: 2.8.3

Рациональный частотный диапазон и критерии диагностирования зон эндогенных пожаров в породугольных массивах методом георадиолокации

С.М. Простов, В.В. Калайгорода✉, Е.А. Шабанов

Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева, Россия, г. Кемерово

✉Kalay232@gmail.com

Аннотация. *Актуальность* исследования обусловлена недостаточной изученностью влияния физических особенностей зон развития эндогенного пожара в породугольном массиве на результаты диагностирования расположения и границ этих зон методом георадиолокации, что снижает точность прогноза. *Целью* исследования является экспериментально-теоретическое обоснование рационального частотного диапазона и критериев диагностирования зон эндогенных пожаров в породугольных массивах методом георадиолокации с учетом физических особенностей этих зон. *Объект:* физические параметры зоны самовозгорания углепородного массива, влияющие на результаты георадиолокационного мониторинга: геометрия очага пожара; диэлектрическая проницаемость и удельное электрическое сопротивление. *Методы:* анализ по экспериментальным данным диапазонов изменения электромагнитных свойств горных пород при изменении температуры и влажности в диапазоне частот георадиолокации; выявление эффективных принципов расчета режимов георадара, обеспечивающих оптимальное сочетание глубинности и разрешающей способности; анализ банка практических радарограмм с аномальными зонами, аналогичными по свойствам зонам эндогенных пожаров. *Результаты.* Рациональный диапазон центральной частоты георадара может быть определен следующими методами: на основе комплексного параметра, включающего излучаемую мощность антенны, число накоплений и коэффициент отражения от границы объекта; по экстремальному значению функции, включающей глубину и детальность зондирования как функции частоты; решением системы уравнений функции ослабления сигнала и энергетического потенциала георадара. Физические особенности зоны эндогенного пожара состоят в высушивании породугольного массива с образованием аномальной зоны с ярко выраженными диэлектрическими свойствами ($\epsilon' = 4-6$; $\rho > 100$ Ом·м), по форме близка к вытянутому эллипсоиду или сплюснутому по вертикали сфероиду. С учетом этих особенностей рациональный диапазон центральной частоты для георадара «ОКО-2» составил 49,2–132,6 МГц, при этом разрешающая способность составит 0,442–1,152 м. При интерпретации радарограммы запожаренные зоны диагностируют по участкам, отличающимся аномальным ослаблением осей синфазности, а зоны обрушенных пород и пустот над очагом – по аномальной хаотичной волновой картине.

Ключевые слова: эндогенные пожары, самовозгорание угля, геофизический мониторинг, георадиолокационное зондирование, электрическое зондирование, центральная частота, разрешающая способность

Для цитирования: Простов С.М., Калайгорода В.В., Шабанов Е.А. Рациональный частотный диапазон и критерии диагностирования зон эндогенных пожаров в породугольных массивах методом георадиолокации // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 8. – С. 68–76. DOI: 10.18799/24131830/2024/8/4418

UDC 622.822.22

DOI: 10.18799/24131830/2024/8/4418

Rational frequency range and criteria for diagnosing endogenous fire zones in coal massifs by using the georadiolocation method

S.M. Prostov, V.V. Kalaygoroda✉, E.A. Shabanov

T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Kemerovo, Russian Federation

✉Kalay232@gmail.com

Abstract. Relevance. The necessity to improve the accuracy of analysis and prediction of potential fire hazard of rock-coal massifs by using electromagnetic methods of endogenous fire detection. Taking into consideration that the increase in coal temperature changes a number of its parameters, such as dielectric permittivity and electrical resistivity, it is reasonable to use the method of electromagnetic reconnaissance in locating the focus of fire. **Aim.** To analyze the theoretical and practical knowledge about the anomalies formed in the area of spontaneous combustion and to evaluate the effectiveness of electromagnetic methods for locating the spontaneous combustion zones of a coal massif. **Objects.** Physical parameters of the ignition zone of the coal massif, such as dielectric permittivity and electrical resistivity, as well as the range of the GPR central frequency, allowing clearly defining the boundaries of the ignited zone. **Method.** Reviewing the proposed methods of determining the parameters serving for correct location of the fire zone. For GPR it is necessary to determine the center frequency of the standard antenna unit and resolution, then to estimate the rational frequency range of GPR. **Results.** Allow us to draw conclusions about the methods used to determine the rational range of GPR center frequency – it can be calculated by solving the system of equations of the signal attenuation function and energy potential of GPR, by the experimental value of the target function, including the depth and detail of sounding as a function of frequency, or on the basis of a complex parameter of GPR, including the radiated power of the antenna, the number of accumulations and the reflection coefficient from the boundaries. Taking into account such physical features of the fire zone as drying the rock-angle massif and the shape of the anomalous zone, the rational range of the center frequency for the GPR "OKO-2" was determined.

Keywords: endogenous fires, coal spontaneous combustion, geophysical monitoring, georadiolocation sounding, electrical sounding, center frequency, resolving ability

For citation: Prostov S.M., Kalaygoroda V.V., Shabanov E.A. Rational frequency range and criteria for diagnosing endogenous fire zones in coal massifs by using the georadiolocation method. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 8, pp. 68–76. DOI: 10.18799/24131830/2024/8/4418

Введение

На сегодняшний день разработка угольных месторождений – один из самых аварийных и опасных видов добычи ископаемых [1]. За последние несколько лет количество аварий в угольной промышленности хоть и имеет тенденцию к снижению, но число эндогенных возгораний угля не уменьшается [2]. В целях разработки действенных мер борьбы с эндогенными пожарами проводятся масштабные исследования процесса самовозгорания породугольных массивов. Так, в работах [3–5] были проведены эксперименты по определению роста интенсивности тепловыделения в зависимости от начальной температуры, крупности, влажности угля и воздуха, а также скорости движения газа. В настоящее время разработаны решения для ограничения доступа кислорода в очаги эндогенных пожаров в минимальные сроки и предотвращения их возникновения в случае протекания интенсивного окислительного процесса [6].

Важным требованием, предъявляемым к открытым геотехнологиям, является снижение негативного воздействия на экологию и здоровье людей. При угольных пожарах в окружающую среду поступает большое количество химических компонентов, что приводит к неблагоприятным экологическим последствиям [7]. Эндогенные пожары ухудшают санитарно-гигиенические условия труда шахтеров, загрязняют воздух прилегающих территорий токсичными продуктами горения и окисления [8].

Для Кузбасса проблема эндогенных пожаров особенно актуальна. Регулярно публикуются научные статьи, отчеты и исследования, в которых опи-

сывается зарегистрированный пожар эндогенного происхождения. Территориями, на которых происходит самовозгорание угольных залежей, выступают различные объекты угольных предприятий – отвалы [9], терриконики [10], пласты ликвидированных шахт [11], угольные склады [12] и т. д.

Проблема эндогенных пожаров волнует не только ученых Кузбасса и России, эту проблему также активно изучают зарубежные исследователи. Их труды направлены на анализ проблем в аспекте самовозгорания угля [13, 14], определение факторов, влияющих на интенсивность разогрева, разработку методов предотвращения и ликвидации эндогенных пожаров [15]. Исследованы такие факторы, способствующие повышению склонности к самовозгоранию, как циклическое замораживание-размораживание угля [16] и приток воздуха, окисляющего уголь, в выработанное пространство [17]. Иностранные исследователи также приводят научный опыт на тему борьбы с последствиями эндогенных пожаров [18, 19].

Одним из наиболее информативных и эффективных способов обнаружения очага эндогенного пожара является применение электромагнитных методов, включающих электрическое зондирование (ЭЗ), геоэлектрический (ГЭ) и георадиолокационный (ГР) метод [20].

Георадиолокационное зондирование (высокочастотное электромагнитное сканирование) основано на отражении электромагнитных волн от неоднородностей, контрастных по диэлектрическим свойствам. Основная область применения георадаров – строительные изыскания с земной поверхности, локация коллекторов, трубопроводов и т. п.

Теории и практике применения георадиолокации посвящено большое количество как отечественных [21–24], так и зарубежных монографий [25–27]; количество же небольших публикаций уже давно исчисляется сотней статей. Однако как первые, так и вторые уделяют внимание в основном практическим аспектам применения георадара в различных геологических условиях, а также вопросам обработки и интерпретации радарограмм. Теоретическим вопросам моделирования (решения прямых и обратных задач) из указанного списка частично или полностью посвящены работы [23, 24, 26].

Возможности георадиолокации для решения задач геомеханики, подземной, открытой и строительной геотехнологии исследованы недостаточно. Кроме технических трудностей, связанных с отсутствием аппаратуры в искробезопасном исполнении, экранированием контура выработки металлическими элементами крепи (рамы, арматура, затяжка), высоким уровнем электромагнитных помех в выработках из-за наличия кабельных ЛЭП и электросиловых установок, активное применение георадаров на шахтах сдерживается отсутствием методик и программного обеспечения для интерпретации подземных радарограмм.

Обнадеживающие результаты получены в Институте горного дела Севера СО РАН. Авторами предложено использовать при интерпретации георадиолокационных данных вейвлет-преобразования, включающего анализ измеренного радаром сигнала на разных частотах и масштабах [28]. Этот подход реализован для радара «Тритон» с центральной частотой 30 МГц. Разработанные теоретические основы и физическое моделирование в данном диапазоне позволили реализовать предложенный метод при изучении мерзлого массива горных пород, отличительной особенностью которого является заполнение пустот и пор породы как льдом, проявляющим диэлектрические свойства, так и электропроводящим талым раствором [29–32].

Проведены испытания георадара ОКО-2 с антенным блоком с центральной частотой 400 МГц в условиях шахты «Талдинская-Западная». Зафиксированы расслоения в кровле подготовительной выработки. Вместе с тем следует отметить, что при интерпретации радарограмм авторы не учитывали указанные выше факторы, существенно влияющие на информативность георадиолокационного метода [33, 34].

В работе [35] изложены результаты использования георадара ОКО-2 с антенным блоком АБ-1200. Основная проблема состояла в сильном влиянии на результаты зондирования полостей, заполненных водой с высокой проводимостью. Применение комплекса корректирующих операций (выравнивание амплитуд, преобразование Гильберта, горизон-

тальная фильтрация) позволило повысить информативность мониторинга.

Целью исследования является экспериментально-теоретическое обоснование рационального частотного диапазона и критериев диагностирования зон эндогенных пожаров в породугольных массивах методом георадиолокации с учетом физических особенностей этих зон.

Материалы и методы

Георадары предназначены для диагностирования зон, аномальных по электромагнитным свойствам, методом бесконтактного подповерхностного зондирования. Основным информирующим электромагнитным параметром при георадиолокации является диэлектрическая проницаемость ε , которая для сред с конечной электрической проводимостью может быть выражена в комплексной формуле [21]:

$$\varepsilon = \varepsilon' + j\varepsilon'',$$

где ε' – действительная часть ε , отражающая процесс поляризации идеального диэлектрика; ε'' – мнимая часть, обусловленная проявлением проводимости, зависящая от удельного электросопротивления ($УЭС$) среды ρ и круговой частоты электромагнитного поля $\omega = 2\pi f$, $\varepsilon'' = 1/\rho\omega$ (f – циклическая частота).

Зона эндогенного пожара на стадиях самовозгорания и развития пожара характеризуется следующими изменениями электромагнитных свойств породугольного массива: вследствие испарения влаги величины ε' и ρ изменяются до значений, соответствующих высушенному состоянию.

Измерения ε' в диапазоне частот георадиолокации (50–3000 МГц) связаны со значительными техническими трудностями, поэтому банк экспериментальных данных весьма ограничен. Так, в работе [36] приведены диапазоны ε' и ρ на частоте 100 МГц (табл. 1).

Таблица 1. Электромагнитные свойства пород ($f=100$ МГц)

Table 1. Electromagnetic properties of rocks ($f=100$ MHz)

Порода/Rock	Степень влажности/Humidity degree			
	Высушенная Dried		Водонасыщенная Water saturated	
	ε'	ρ , Ом·м/Ohms·m	ε'	ρ , Ом·м/Ohms·m
Грунт песчаный Sandy soil	4–6	$10^2 - 10^4$	15–30	$10^1 - 10^2$
Суглинок/Loam	4–6	$10^3 - 10^4$	10–20	$10^1 - 10^2$
Грунт глинистый Clay soil	4–6	$10^1 - 10^4$	10–15	$1 - 10^1$
Глина/Clay	2–6	$10^1 - 10^3$	15–40	$1 - 10^1$
Гранит/Granite	5	$10^6 - 10^8$	6	$10^2 - 10^3$
Известняк Limestone	7	$10^6 - 10^9$	8	$10^1 - 10^2$

Кроме того, отмечается, что с повышением температуры влажного пористого грунта величина ρ уменьшается в 1,5–2,0 раза за счет снижения вязкости порозаполняющих жидкостей.

Более детальные данные о характере изменения электромагнитных параметров песчано-глинистых грунтов в диапазоне частот $f=30\text{--}2000$ МГц приведены в работе [37] (рис. 1).

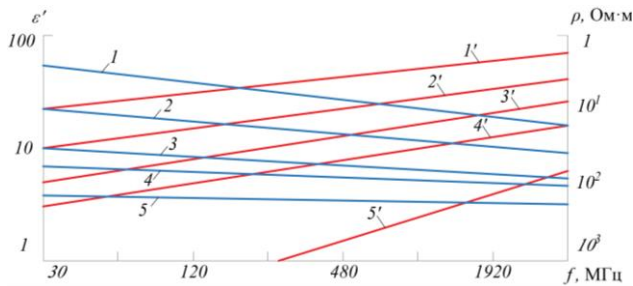


Рис. 1. Зависимость электромагнитных свойств суглинка серого от частоты f : 1 – ε' при влажности $W=20\%$; 2 – ε' при $W=10\%$; 3 – ε' при $W=5\%$; 4 – ε' при $W=2,5\%$; 5 – ε' при $W=0\%$; 1' – ρ при $W=20\%$; 2' – ρ при $W=10\%$; 3' – ρ при $W=5\%$; 4' – ρ при $W=2,5\%$; 5' – ρ при $W=0\%$

Fig. 1. Dependence of electromagnetic properties of gray loam on frequency f : 1 – ε' at humidity $W=20\%$; 2 – ε' at $W=10\%$; 3 – ε' at $W=5\%$; 4 – ε' at $W=2,5\%$; 5 – ε' at $W=0\%$; 1' – ρ at $W=20\%$; 2' – ρ at $W=10\%$; 3' – ρ at $W=5\%$; 4' – ρ at $W=2,5\%$; 5' – ρ at $W=0\%$

Из приведенных данных следует, что по мере повышения температуры и снижения влажности породугольного массива ($W \rightarrow 0$) в очаге эндогенного пожара происходит формирование зоны с ярко выраженными диэлектрическими свойствами ($\varepsilon' < 4\text{--}6$; $\rho > 100$ Ом·м).

Частотный диапазон георадиолокации в значительной мере влияет на основные параметры точности диагностирования аномальной зоны: глубинность и разрешающая способность.

Оценка глубинности георадиолокационного зондирования представляет собой весьма сложную задачу, поскольку на затухание генерируемых электромагнитных волн влияет целый ряд факторов, точный учет которых в условиях неоднородности среды практически невозможен:

- потери за счет наведения вихревых токов в проводящей среде и формирования вторичного поля (скин-эффект);
- расхождение волны по мере удаления от источника (антенны);
- расхождение и преломление сигнала на границах диэлектрически контрастных слоев.

Под глубиной зондирования H понимают максимальную глубину границы исследуемого

объекта, которая может быть зафиксирована на радарограмме данной аппаратурой, а разрешающая способность – это минимальное расстояние Δ по глубине (в плане) между соседними объектами или их элементами [21]. Выбор рациональной центральной частоты f_0 георадара является задачей оптимизации, поскольку с увеличением f_0 глубинность зондирования H и величина, обратная разрешающей способности ($1/\Delta$), снижаются.

Для решения поставленной в работе задачи возможны следующие пути.

1. Из условий равенства мощности волны, отраженной от границы на глубине H , и мощности собственных шумов приемного тракта следует, что величина H линейно зависит от $\lg Q$ [21]:

$$Q = P_0 N K_{\text{отр}}^2, \quad (1)$$

где Q – комплексный параметр георадиолокации; P_0 – излучаемая мощность антенны; N – число накоплений; $K_{\text{отр}}$ – коэффициент отражения от нижней границы объекта.

Получены линейные зависимости $H = H(f_0, \lg Q, \rho)$, по найденному значению f_0 выбирают ближайшую меньшую центральную частоту штатного антенного блока. Разрешающую способность проверяют из условия:

$$\Delta < \frac{1}{2} \lambda = \frac{c}{2 f_0 \sqrt{\varepsilon'}}, \quad (2)$$

где λ – длина волны в среде; c – скорость волны в вакууме.

В работе [38] предложено ввести целевую функцию

$$F(f) = F[H(f, \rho); \Delta(f, \varepsilon')],$$

включающую оба критериальных параметра H , Δ , электромагнитные параметры ρ , ε' , постоянную, комплексно учитывающую все неизменяемые параметры зондирования, и требуемую детальность.

Теоретическое значение f_0 определится из решения уравнения

$$\frac{dF}{df} = 0: f_0 = \left(\frac{1,125C}{L} K \sqrt{\frac{\rho}{\varepsilon'}} \right), \quad (3)$$

где $L=3\text{--}10$ м² – постоянная, отражающая диапазон детальности; $K=3 \cdot 10^{12}$ м·Гц^{1,5}(Ом·м)^{−0,5} – постоянная, включающая неизменные параметры зондирования.

2. Наиболее экспериментально и теоретически обоснованной представляется методика, предложенная в работе [22], идея которой состоит в сопоставлении функции ослабления сигнала A (дБ/м) с энергетическим потенциалом E (дБ) георадара. В расчетах были использованы следующие зависимости:

$$A = \frac{20}{\ln(10)} \sqrt{\frac{\pi}{C\varepsilon_0\lambda\rho}};$$

$$E = 20\lg\left(\frac{U_r}{U_t}\right) + 10\lg N - E_{\text{сш}},$$

где U_r , U_t – соответственно, напряжения на выходе генератора и сигнала помехи на входе приемника; N – число накоплений сигнала; $E_{\text{сш}}$ – соотношение (в дБ) «сигнал–шум».

Приведены решения этой системы уравнений относительно f_0 в графической форме (номограммы) для плоскостных, линейных и локальных объектов.

Для оценки разрешающей способности рекомендовано использовать выражение

$$\Delta < \frac{1}{2} \sqrt{\lambda H}. \quad (4)$$

Результаты исследования

Рассмотрим физические особенности зоны эндогенного пожара объекта исследований.

Метод георадиолокации целесообразно применять на стадиях самонагрева и развития пожара, когда электромагнитные свойства пород в очаге изменяются существенно вследствие удаления влаги. По данным экспериментально-теоретических исследований [3, 4, 11] развитие пожара в глубине угленосного массива возможно при условии превышения количества тепла, образующегося при окислении и горении угля за счет притока кислорода, количества тепла, отдаваемого в окружающее пространство вследствие термодинамических процессов. При этом зона развития пожара классифицируется как плоскостной объект с относительно стабильным расположением очага (верхней и нижней границ) в диапазоне $H=3\text{--}6$ м. С учетом данных табл. 1 и средних значений электромагнитных свойств, вмещающих безугольных пород для условий Кузбасса [22] необходимые для расчетов значения электромагнитных параметров вне и внутри объекта составят соответственно: $\rho_1=46,3$ Ом·м; $\varepsilon'_1=11,5$; $\rho_2\approx 10^3$ Ом·м; $\varepsilon'_2=5$. Тогда расчетный коэффициент отражения от верхней границы объекта составит

$$K_{\text{отр}} = \frac{\sqrt{\varepsilon'_1} - \sqrt{\varepsilon'_2}}{\sqrt{\varepsilon'_1} + \sqrt{\varepsilon'_2}} = 0,206.$$

Перейдем к оценке рационального частотного диапазона георадиолокации для рассматриваемого объекта по трем рассмотренным выше методикам для георадара «ОКО-2». Результаты расчетов сведены в табл. 2.

Для пояснения расчета методом 3 приведены зависимости центральной частоты f_0 от глубины H и числа накоплений N для плоскостных объектов [22. С. 50].

Таблица 2. Результаты расчетов рациональных параметров f_0 и Δ для георадара «ОКО-2»

Table 2. Results of calculations of rational parameters f_0 and Δ for georadar «OKO-2»

Величина Value	Метод 1 [21] (формула) Method 1 (formula)	Метод 2 [38] (формула) Method 2 (formula)	Метод 3 [22] Method 3
Промежуточная величина Intermediate value	(1) $Q=8520$ Вт/В $P_0=200$ Вт/В $N=10^3$	$L=10$ м ² /м ² $K=3\cdot 10^{12}$ м·Гц ^{1,5} /(Ом·м) ^{-0,5} м·Гц ^{1,5} /(Ом·м) ^{-0,5}	$H=3$ м/м $N=10^4$
f_0	$\lg Q=3,91$ $\rho_2=10^3$ Ом·м/Ом·м [21. С. 38] 100 МГц/MHz	(3) 132,6 МГц/MHz	$H=3$ м/м $N=10^4$ (рис. 2) 49,2 МГц/MHz
Δ	(2) 0,442 м/м	(4) $\lambda=0,667$ м/м 0,707 м/м	$\lambda=1,770$ м/м 1,152 м/м

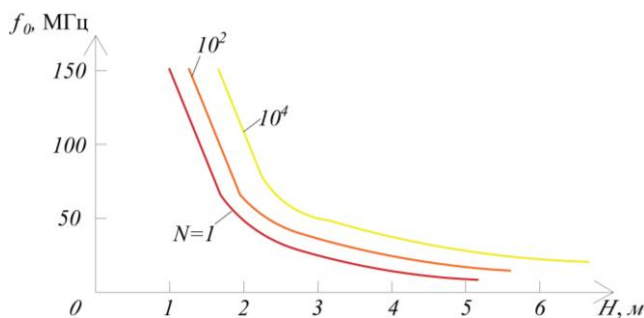


Рис. 2. Расчетные значения f_0 в зависимости от глубины зондирования H и числа накоплений N по данным [22] для плоскостных объектов

Fig. 2. Calculated values f_0 depending on the depth of sensing H and the number of savings N according to [22] for planar objects

Обсуждение и заключение

Таким образом, с учетом физических особенностей зоны эндогенного пожара рациональный диапазон центральной частоты георадиолокации по различным методикам оценки составляет $f_0=49,2\text{--}132,6$ МГц, при этом диапазон детальности $\Delta=0,44\text{--}1,15$ м.

При диагностировании запожаренных зон на радарограммах следует учитывать следующие особенности этих объектов:

- при развитии пожаров в борту угольного разреза эта зона будет иметь форму вытянутого сфероида с большей осью, параллельной бровке уступа, а при развитии пожара под плоской горизонтальной поверхностью она будет близка к сплюснутому по вертикали сфероиду или цилиндру;
- на начальных стадиях интенсивного горения угля из-за высокой температуры образуются зоны высушенной породы с предельно низкими значениями $\varepsilon'=4\text{--}6$, поэтому эти зоны на радарограммах должны характеризоваться понижен-

ными значениями амплитуд отраженного сигнала и существенным ослаблением осей синфазности;

- при длительном горении и выгорании угля вероятно образование пустот, приводящих к обрушению над очагом вплоть до земной поверхности, которые отличаются на радарограммах хаотичным типом волновой картины при практическом отсутствии осей симфазности отраженных волн.

В качестве примера применения приведенных выше критериев интерпретации результатов георадиолокации на рис. 3 приведен фрагмент радарограммы, полученной георадаром «ОКО-2» с антенным блоком АБ-150 ($f_0=150$ МГц) в борту угольного разреза «Бачатский» [39].

На радарограмме достаточно четко выделяются запожаренные участки на интервалах профиля $x = -120 - -60$ м и $x = -20 - -40$ м на глубине 2–4 м (значительно ослаблены линии синфазности), а на интервале $x = -40 - -20$ м между этими зонами радарограмма имеет хаотичную волновую картину, что указывает на вероятное образование пустот и обрушенных пород.

Результаты георадиомониторинга согласуются с данными визуальных наблюдений и контактной геофизики.

Выводы

1. Рациональный диапазон центральной частоты георадара f_0 может быть определен следующими

методами: на основе комплексного параметра георадиолокации, включающего излучаемую мощность антенны, число накоплений и коэффициент отражения от границы объекта; по экстремальному значению целевой функции, включающей глубину и детальность зондирования как функции частоты; решением системы уравнений функции ослабления сигнала и энергетического потенциала георадара. Разрешающая способность Δ с достаточной степенью точности равна половине длины волны в среде.

2. Физические особенности зоны эндогенного пожара на стадиях самовозгорания и интенсивного горения состоят в высушивании породугольного массива с образованием аномальной зоны с ярко выраженными диэлектрическими свойствами ($\epsilon' = 4-6$; $\rho > 100$ Ом·м), по форме близка к вытянутому эллипсоиду (в борту угольного разреза) или сплюснутому по вертикали сфероиду (под плоской поверхностью). С учетом этих особенностей расчетный рациональный диапазон центральной частоты для георадара «ОКО-2» составил $f_0 = 49,2-132,6$ МГц, при этом разрешающая способность составит $\Delta = 0,442-1,152$ м.
3. При интерпретации радарограммы запожаренные зоны диагностируют по участкам, отличающимся аномальным ослаблением осей синфазности, а зоны обрушенных пород и пустот над очагом – по аномальной хаотичной волновой картине.

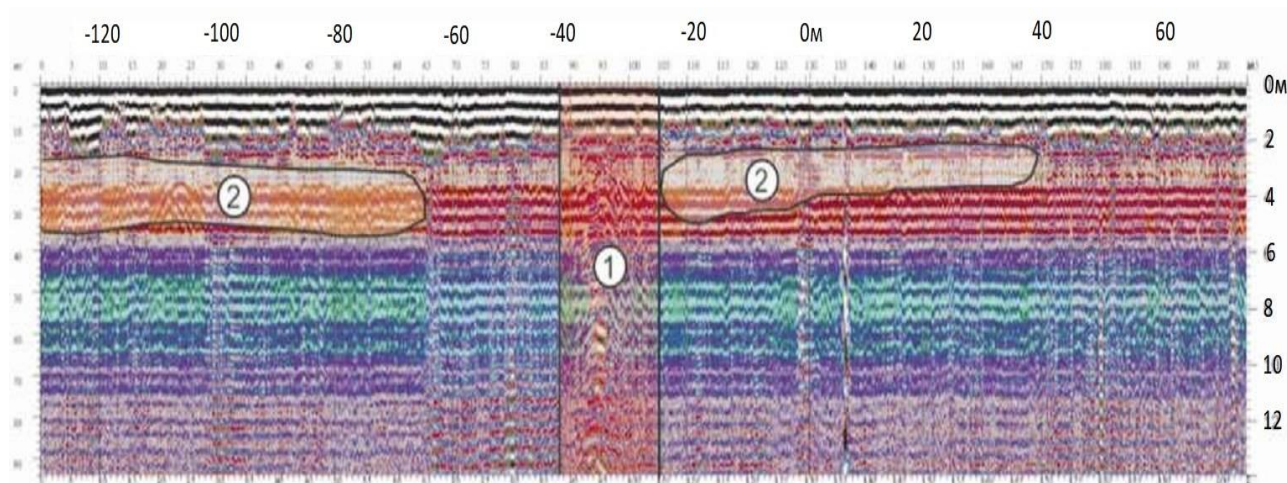


Рис. 3. Радарограмма, полученная на участке борта угольного разреза «Бачатский»: 1 – зона эндогенного пожара; 2 – зона обрушения

Fig. 3. Radarogram obtained at the site of the side of the Bachatsky coal mine: 1 – endogenous fire zone; 2 – collapse zone

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Куприянов В.В., Бондаренко И.С. Факторы влияния на резерв времени для выхода из подземных аварий в шахтах // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 2. – С. 139–149.
2. Гридина Е.Б., Мирошниченко А.К. Устранение очагов самовозгорания угля на основе использования торфяных пожарных стволов // Научно-технический журнал «Вестник». – 2021. – № 1. – С. 83–86.
3. Tarafadar M.N., Guha D. Application of wet oxidation processes for the assessment of the spontaneous heating of coal // Fuel. – 1989. – Vol. 68. – P. 315–317.
4. Nimaje D.S., Tripathy D.P. Thermal studies on spontaneous heating of coal // The Indian Mining & Engineering Journal. – 2010. – № 48 – P. 10–17.
5. Risk evaluation of coal spontaneous combustion on the basis of autoignition temperature / Y. Zhang, Y. Liu, X. Shi, C. Yang, W. Wang, Y. Li // Fuel. – 2018. – Vol. 233. – P. 68–76.
6. Технологические решения по локализации очагов эндогенных пожаров при отработке прибортовых запасов системами с обрушением руды и вмещающих пород / А.М. Мажитов, С.А. Корнеев, А.Н. Смяткин, Б.М. Габбасов // Горная промышленность. – 2022. – № 1. – С. 122–127.
7. Kunli L., Douhu W., Jianan T. Lead emission amount from coal combustion and its environment effect in Xi'an City // J. Environ. Sci – China. – 2002. – Vol. 23. – P. 123–125.
8. Bigliardi A.P., Fernandes C.L.F., Pinto E.A. Blood markers among residents from a coal mining area // Environmental Science Pollution Research. – 2021. – Vol. 28 (2). – P. 1409–1416.
9. Портола В.А., Бобровникова А.А., Щербакова В.А. Оценка опасности развития очагов самовозгорания на породном отвале // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2023. – № 1. – С. 48–53.
10. Акулов Н.И., Прокопьев С.А., Прокопьев Е.С. Самовозгорание техногенно-переотложенных угленосных отложений Кузбасса // Уголь. – 2022. – № S12. – С. 53–59.
11. Применение температурной и газовых съемок для обнаружения и локации очагов эндогенных пожаров на выходах пластов ликвидированной шахты / В.А. Портола, А.А. Бобровникова, С.В. Ковалев, Е.А. Киренберг // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2023. – № 3 (157). – С. 79–90.
12. Ерастов А.Ю., Потапов П.В., Шлапаков П.А. Опыт применения геофизической съемки и тепловизионного контроля для выявления очагов самонагрева на угольных складах и выбора способа их тушения // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2012. – № 2. – С. 152–156.
13. Analytical prediction of coal spontaneous combustion tendency: velocity range with possibility of self-ignition / Q. Lin, S. Wang, S. Song, Y. Liang, T. Ren // Fuel Processing Technology. – 2017. – Vol. 159. – P. 38–47.
14. Onifade M., Genc B. Spontaneous combustion of coals and coal-shales // International Journal of Mining Science and Technology. – 2018. – Vol. 28. – P. 993–940.
15. Rosema A., Guan Y., Veld H. Simulation of spontaneous combustion, to study the causes of coal fires in the Rujigou Basin // Fuel. – 2001. – Vol. 80 (1). – P. 7–16.
16. Experimental studies of spontaneous combustion and anaerobic cooling of coal / J. Deng, Y. Xiao, Q. Li, J. Lu, H. Wen // Fuel. – 2015. – Vol. 157. – P. 261–269.
17. Determination and prediction on «three zones» of coal spontaneous combustion in a gob of fully mechanized caving face / J. Deng, C. Lei, Y. Xiao, K. Cao, L. Ma, W. Wang, B. Laiwang // Fuel. – 2018. – Vol. 211. – P. 458–470.
18. Thermal behavior and micro characterization analysis of second-oxidized coal / J. Deng, J.U. Zhao, Y.N. Zhang, C.P. Wang, A.C. Huang // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. – 2017. – Vol. 127. – Iss. 1. – P. 439–448.
19. Tao Xu. Heat effect of the oxygen-containing functional groups in coal during spontaneous combustion processes // Advanced Powder Technology. – 2017. – Vol. 28 (8). – P. 1841–1848.
20. Обнаружение и локация подземных очагов самовозгорания методом электрического зондирования / В.А. Нарский, В.А. Портола, Е.А. Разумов, В.Г. Венгер // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2021. – № 3. – С. 52–58.
21. Владов М.Л., Старовойтов А.В. Введение в георадиолокацию. – М.: Изд-во МГУ, 2005. – 153 с.
22. Изюмов С.В., Дручинин С.В., Вознесенский А.С. Теория и методы георадиолокации. – М.: Горная книга, 2008. – 196 с.
23. Александров П.Н. Теоретические основы георадарного метода. – М.: Физматлит, 2017. – 120 с.
24. Theoretical justification for the one-dimensional geolocation method / D. Sirota, S. Prostov, E. Razumov, N. Loskutov // International innovative Mining Symposium E3S Web of Conferences. – Kemerovo, Russian Federation, October 19–21, 2020. – Vol. 174. – P. 1–5.
25. Jol H.M. Ground penetrating radar: theory and applications – Elsevier Science, 2009. – 402 p.
26. Lavoue F. 2D full waveform inversion of ground penetrating radar data: towards multiparameter imaging from surface data. – P.: Earth Sciences, 2014. – 234 p.
27. Bristow C.S., Jol H.M. Ground penetrating radar in sediments. – L.: Geological Society, 2003. – 327 p.
28. Федорова Л.Л., Соколов К.О. Решение задач обработки и интерпретации георадиолокационных данных на основе вейвлет-анализа // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2008. – № 8. – С. 153–158.
29. Соколов К.О. Частотно-временное предоставление георадиолокационных разрезов на основе непрерывного вейвлет-преобразования // ФТПРПИ. – 2014. – № 1. – С. 77–81.
30. Соколов К.О. Вейвлет-критерий для анализа данных георадиолокации мерзлого горного массива // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2014. – № 11. – С. 262–265.
31. Соколов К.О. Возможности георадиолокации при изучении геомеханических свойств массива горных пород // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2015. – № 6. – С. 113–115.
32. Прудский Н.Д., Соколов К.О., Федорова Л.Л. Физическое моделирование распространения электромагнитной высокочастотной волны в массиве горных пород с трещиной заполненной льдом // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2018. – № 11. – С. 107–113.

33. Анализ обследований состояния горных выработок закрепленных анкерной крепью с применением георадара / В.А. Бакин, Е.Ю. Пудов, Е.Г. Кузин, К.К. Ремпель // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2015. – № 10. – С. 172–177.
34. Калинин С.М., Пудов Е.Ю., Кузин Е.Г. Перспективы применения георадиолокации для определения состояния кровли шахтовых выработок // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2015. – № 11. – С. 297–299.
35. Набатов В.В., Гайсин Р.М. Обработка данных георадиолокационной съемки при выявлении полостей в заобделочном пространстве // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2018. – № 1. – С. 19–25.
36. Daniels D.J. Surface-Penetrating Radar. – London, UK: IEE, 1996. – 390 p.
37. Финкельштейн М.И., Золотарев В.П., Кутев В.А. Применение радиолокационного подповерхностного зондирования в инженерной геологии. – М.: Недра, 1986. – 128 с.
38. Простов С.М., Никулин Н.Ю. Обоснование рационального частотного диапазона георадиолокационного мониторинга // Вестник РАЕН. – 2012. – № 14. – С. 38–46.
39. Комплексный геофизический мониторинг для локализации очагов эндогенных пожаров в борту угольного разреза / В.В. Калайгорода, С.М. Простов, Е.А. Шабанов, Н.Ю. Никулин // Известия вузов. Горный журнал. – 2023. – № 4. – С. 120–131.

Информация об авторах

Сергей Михайлович Простов, доктор технических наук, профессор кафедры строительного производства и экспертизы недвижимости, Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева, Россия, 650002, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28. psm.kem@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0780-2690>

Всеволод Владимирович Калайгорода, аспирант, Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева, Россия, 650002, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28. Kalay232@gmail.com

Евгений Анатольевич Шабанов, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой строительного производства и экспертизы недвижимости, Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева, Россия, 650002, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28. evgenshab@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2460-6467>

Поступила в редакцию: 03.10.2023

Поступила после рецензирования: 09.01.2023

Принята к публикации: 24.05.2024

REFERENCES

1. Kupriyanov V.V., Bondarenko I.S. Factors of influence on the reserve of time for recovery from underground accidents in mines. *Mining information and analytical bulletin*, 2022, no. 2, pp. 139–149. (In Russ.)
2. Gridina E.B., Miroshnichenko A.K. Elimination of spontaneous combustion of coal based on the use of peat fire barrels. *Scientific and Technical journal "Vestnik"*, 2021, no. 1, pp. 83–86. (In Russ.)
3. Tarafadar M.N., Guha D. Application of wet oxidation processes for the assessment of the spontaneous heating of coal. *Fuel*, 1989, no. 68, pp. 315–317.
4. Nimaje D.S., Tripathy D.P. Thermal studies on spontaneous heating of coal. *The Indian Mining & Engineering Journal*, 2010, no. 48, pp. 10–17.
5. Zhang Y., Liu Y., Shi X., Yang C., Wang W., Li Y. Risk evaluation of coal spontaneous combustion on the basis of autoignition temperature. *Fuel*, 2018, vol. 233, pp. 68–76.
6. Mazhitov A.M., Korneev S.A., Smyatkin A.N., Gabbasov B.M. Technological solutions for localization of foci of endogenous fires during the development of on-board reserves by systems with collapse of ore and host rocks. *Mining industry*, 2022, no. 1, pp. 122–127. (In Russ.)
7. Kunli L., Douhu W., Jianan T. Lead emission amount from coal combustion and its environment effect in Xi'an City. *J. Environ. Sci – China*, 2002, vol. 23, pp. 123–125.
8. Bigliardi A.P., Fernandes C.L.F., Pinto E.A. Blood markers among residents from a coal mining area. *Environmental Science Pollution Research*, 2021, vol. 28 (2), pp. 1409–1416.
9. Portola V.A., Bobrovnikova A.A., Shcherbakova V.A. Assessment of the danger of spontaneous combustion on the rock dump. *Bulletin of the Scientific Center for the safety of work in the coal industry*, 2023, no. 1, pp. 48–53. (In Russ.)
10. Akulov N.I., Prokopyev S.A., Prokopyev E.S. Spontaneous combustion of technogenically re-deposited coal-bearing deposits of Kuzbass. *Coal*, 2022, no. S12, pp. 53–59. (In Russ.)
11. Portola V.A., Bobrovnikova A.A., Kovalev S.V., Kirenberg E.A. Application of temperature and gas surveys for detection and location of foci of endogenous fires at the exits of the liquidated mine layers. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*, 2023, no. 3 (157), pp. 79–90. (In Russ.)
12. Erastov A.Yu., Potapov P.V., Shlapakov P.A. The experience of using geophysical survey and thermal imaging control to identify foci of self-heating in coal warehouses and the choice of a method for extinguishing them. *Bulletin of the Scientific Center for safety of work in the coal industry*, 2012, no. 2, pp. 152–156. (In Russ.)
13. Lin Q., Wang S., Song S., Liang Y., Ren T. Analytical prediction of coal spontaneous combustion tendency, velocity range with possibility of self-ignition. *Fuel Processing Technology*, 2017, vol. 159, pp. 38–47.

14. Onifade M., Genc V. Spontaneous combustion of coals and coal-shales. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2018, vol. 28, pp. 993–940.
15. Rosema A., Guan Y., Veld H. Simulation of spontaneous combustion, to study the causes of coal fires in the Rujigou Basin. *Fuel*, 2001, vol. 80 (1), pp. 7–16.
16. Deng J., Xiao Y., Li Q., Lu J., Wen H. Experimental studies of spontaneous combustion and anaerobic cooling of coal. *Fuel*, 2015, vol. 157, pp. 261–269.
17. Deng J., Lei C., Xiao Y., Cao K., Ma L., Wang W., Laiwang B. Determination and prediction on «three zones» of coal spontaneous combustion in a gob of fully mechanized caving face. *Fuel*, 2018, vol. 211, pp. 458–470.
18. Deng J., Zhao J.U., Zhang Y.N., Wang C.P., Huang A.C. Thermal behavior and micro characterization analysis of second-oxidized coal. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2017, vol. 127, Iss. 1, pp. 439–448.
19. Tao Xu. Heat effect of the oxygen-containing functional groups in coal during spontaneous combustion processes. *Advanced Powder Technology*, 2017, vol. 28 (8), pp. 1841–1848.
20. Narsky V.A., Portola V.A., Razumov E.A., Wenger V.G. Detection and location of underground spontaneous combustion foci by electric sounding. *Bulletin of the Scientific Center for work safety in the coal industry*, 2021, no. 3, pp. 52–58. (In Russ.)
21. Vladov M.L., Starovoitov A.V. *Introduction to georadiolocation*. Moscow, Moscow State University Publ. House, 2005. 153 p. (In Russ.)
22. Izyumov S.V., Druchinin S.V., Voznesensky A.S. *Theory and methods of georadiolocation*. Moscow, Mountain Book Publ., 2008. 196 p. (In Russ.)
23. Alexandrov P.N. *Theoretical foundations of the georadar method*. Moscow, Fizmatlit Publ., 2017. 120 p. (In Russ.)
24. Sirota D., Prostov S., Razumov E., Loskutov N. Theoretical justification for the one-dimensional geolocation method. *International innovative Mining Symposium E3S Web of Conferences*. Kemerovo, Russian Federation, October 19–21, 2020. Vol. 174, pp. 1–5.
25. Jol H.M. *Ground penetrating radar: theory and applications*. Elsevier Science, 2009. p. 402.
26. Lavoue F. *2D full waveform inversion of ground penetrating radar data: towards multiparameter imaging from surface data*. Paris, Earth Sciences, 2014. 234 p.
27. Bristow C.S., Jol H.M. Ground penetrating radar in sediments. L., *Geological Society*, 2003. 327 p.
28. Fedorova L.L., Sokolov K.O. Solving problems of processing and interpretation of geo-radar data based on wavelet analysis. *Mining information and analytical bulletin*, 2008, no. 8, pp. 153–158. (In Russ.)
29. Sokolov K.O. Frequency-time provision of georadiolocation sections based on continuous wavelet transform. *FTPRPI*, 2014, no. 1, pp. 77–81. (In Russ.)
30. Sokolov K.O. Wavelet criterion for analysis of georadiolocation data of frozen mountain array. *Mining information and analytical bulletin*, 2014, no. 11, pp. 262–265. (In Russ.)
31. Sokolov K.O. Possibilities of georadiolocation in the study of geomechanical properties of a rock mass. *Mining information and analytical bulletin*, 2015, no. 6, pp. 113–115. (In Russ.)
32. Prudetsky N.D., Sokolov K.O., Fedorova L.L. Physical modeling of electromagnetic high-frequency wave propagation in an array of rocks with a crack filled with ice. *Mining information and analytical Bulletin*, 2018, no. 11, pp. 107–113. (In Russ.)
33. Bakin V.A., Pudov E.Y., Kuzin E.G., Rempel K.K. Analysis of surveys of the state of mine workings fixed with anchorage using georadar. *Mining information and analytical bulletin*, 2015, no. 10, pp. 172–177. (In Russ.)
34. Kalinin S.M., Pudov E.Y., Kuzin E.G. Prospects of using georadiolocation to determine the condition of the roof of mine workings. *Mining information and analytical bulletin*, 2015, no. 11, pp. 297–299. (In Russ.)
35. Nabatov V.V., Gaisin R.M. Processing of geo-radar survey data when detecting cavities in the back-up space. *Mining information and analytical bulletin*, 2018, no. 1, pp. 19–25. (In Russ.)
36. Daniels D.J. *Surface-penetrating radar*. London, UK, IEE, 1996. 390 p.
37. Finkelstein M.I., Zolotarev V.P., Kutev V.A. *Application of radar subsurface sounding in engineering geology*. Moscow, Nedra Publ., 1986. 128 p. (In Russ.)
38. Prostov S.M., Nikulin N.Y. Substantiation of the rational frequency range of geo-radar monitoring. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences*, 2012, no. 14, pp. 38–46. (In Russ.)
39. Kalaygoroda V.V., Prostov S.M., Shabanov E.A., Nikulin N.Y. Integrated geophysical monitoring for the location of foci of endogenous fires in the board of a coal mine. *Izvestiya vuzov. Mining Journal*, 2023, no. 4, pp. 120–131. (In Russ.)

Information about the authors

Sergey M. Prostov, Dr. Sc., Professor, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 28, Vesennyya street, Kemerovo, 650002, Russian Federation. psm.kem@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0780-2690>

Vsevolod V. Kalaygoroda, Postgraduate Student, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 28, Vesennyya street, Kemerovo, 650002, Russian Federation. Kalay232@gmail.com

Evgeny A. Shabanov, Cand. Sc., Associate Professor, Head of the Department of Construction Production and Expertise, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 28, Vesennyya street, Kemerovo, 650002, Russian Federation. evgenshab@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2460-6467>

Received: 03.10.2023

Revised: 09.01.2023

Accepted: 24.05.2024

УДК 551.583.7
DOI: 10.18799/24131830/2024/8/4403
Шифр специальности ВАК: 1.6.5

Минеральный состав донных отложений озера Сабакты как индикатор палеоклимата, Южный Урал, Россия

А.Р. Юсупова[✉], Н.Г. Нургалиева, А.М. Рогов

Казанский федеральный университет, Россия, г. Казань

[✉]i@ajusupova.ru

Аннотация. Реконструкция климатических изменений по донным отложениям современных озер позволяет выявить климатические тренды и события в позднечетвертичное время. Урал рассматривается как один из климато-разделов, поэтому исследования условий озерного седиментогенеза, в том числе климатических, актуальны на данной территории, где из многочисленных озер изучены лишь единичные. **Цель:** изучение минерального состава как индикатора палеоклимата донных отложений озера Сабакты. **Объект:** керн донных отложений озера Сабакты длиной 298 см, возраст которых составляет не менее 25 тыс. к.л.н. **Методы.** Отбор образцов проводился с учетом сейсмоакустических данных, литологической неоднородности, а также экспрессного измерения магнитной восприимчивости и данных радиометрического датирования. Гранулометрический анализ осуществлялся методом лазерной гранулометрии с использованием анализатора размера частиц Bluewave (Microtrac, США), совмещённого с системой загрузки и циркуляции пробы с интегрированным ультразвуковым диспергатором. Минеральный состав осадков был определен при помощи рентгеновского дифрактометра D2 PHASER и автоэмиссионного сканирующего электронного микроскопа Merlin. **Результаты.** По всему разрезу установлено доминирование алевритовой фракции. Результаты рентгенодифрактометрии и электронной микроскопии показали, что минеральный состав характеризуется преобладанием в осадках аллотигенных минералов (кварц, микроклин, альбит, слюда, хлорит, смешанно-слоистые глинистые минералы, роговая обманка, каолинит). Аутигенные минералы включают биогенный кремнезем (кристобалит, тридимит), пирит, карбонаты (кальцит, доломит), сульфаты (гипс, барит). **Выводы.** Соотношение аллотигенной и аутигенной составляющих отражает климатически обусловленный режим поставки кластического материала. Эпизоды увеличения/уменьшения влажности климата проявляются в изменениях содержаний карбонатных и сульфатных минералов. Выявлено, что во время начального этапа осадконакопления (~26000–11700 к.л.н.) озеро Сабакты было мелководным и минерализованным вследствие аридизации климата, включавшей, вероятно, и глобальное событие Бонда 8. Изучение минерального состава осадков озера Сабакты позволило установить события аридизации климата: ~10000 к.л.н., ~7600 к.л.н., ~6900 к.л.н., ~1900 к.л.н. и ~1400 к.л.н. В осадках озера Сабакты отмечается яркий эпизод уменьшения влажности климата в интервале ~7300–5200 к.л.н., который сопровождается увеличением карбонатности до 70 % и обнаружением гипса на отметке ~6900 к.л.н.

Ключевые слова: палеоклимат, голоцен, озерные осадки, минеральный состав, гранулометрия

Благодарности: Работа выполнена за счет средств субсидии, выделенной Казанскому федеральному университету для выполнения государственного задания проект № FZSM-2023-0023 в сфере научной деятельности, гранулометрический анализ выполнен за счет средств Программы стратегического академического лидерства Казанского (Приволжского) федерального университета (ПРИОРИТЕТ-2030).

Для цитирования: Юсупова А.Р., Нургалиева Н.Г., Рогов А.М. Минеральный состав донных отложений озера Сабакты как индикатор палеоклимата, Южный Урал, Россия // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 8. – С. 77–90. DOI: 10.18799/24131830/2024/8/4403

UDC 551.583.7

DOI: 10.18799/24131830/2024/8/4403

Mineral composition of lake Sabakty sediments as an indicator of paleoclimate, Southern Urals, Russia

A.R. Yusupova[✉], N.G. Nurgalieva, A.M. Rogov

Kazan Federal University, Kazan, Russian Federation

[✉]i@ajusupova.ru

Abstract. Relevance. Reconstruction of climatic changes based on the lacustrine sediments of lakes makes it possible to identify climatic trends and events in the late Quaternary. The Urals is considered as one of the climatic divisions, therefore, studies of the conditions of lake sedimentation, including climatic ones, are relevant in this area. **Aim.** To study mineral composition as an indicator of paleoclimate of Lake Sabakty sediments. **Object.** Core of Lake Sabakty sediments (length is 298 cm). The age of the core is ~25 thousand years old. **Materials and methods.** Sampling was carried out taking into account seismo-acoustic data, lithological description, as well as measurements of magnetic susceptibility and radiometric dating data. The granulometric analysis was carried out by laser granulometry using a Bluewave particle size analyzer (Microtrac, USA) combined with a sample loading and circulation system with an integrated ultrasonic dispersant. Mineral composition of the sediments was determined using the D2 PHASER X-ray diffractometer and the Merlin auto-emission scanning electron microscope. **Results.** The predominance of the siltstone fraction was established. The mineral composition is characterized by the predominance of allotigenic minerals in sediments (quartz, microcline, albite, mica, chlorite, mixed-layer clay minerals, hornblende, kaolinite) according to X-ray diffraction and electron microscopy. Autigenic minerals include biogenic silica (cristobalite, tridymite), pyrite, carbonates (calcite, dolomite), sulfates (gypsum, barite). **Conclusions.** The ratio of allogenic and autogenic components reflects the changes in the accommodation of the reservoir and the supply of clastic material associated with changes in climate humidity. Changes in climate humidity are reflected in changes in the contents of carbonate and sulfate minerals. At the beginning of sedimentation, Lake Sabakty was shallow and mineralized due to climate aridization, which probably included the global Bond 8 event (~26000–11700 BP). The study of the mineral composition of the sediments of Lake Sabakty allowed us to establish the events of climate aridization: ~10000 BP, ~7600 BP, ~6900 BP ~1900 BP and ~1400 BP. In Sabakty Lake, there is a bright episode of a decrease in climate humidity in the range of ~7300–5200 BP, which is marked by an increase in carbonate content up to 70% and the detection of gypsum at ~6900 BP.

Keywords: Paleoclimate, Holocene, lacustrine sediments, mineral composition, granulometry

Acknowledgements: This work was funded by the subsidy allocated to Kazan Federal University for the state assignment project no. FZSM-2023-0023 in the sphere of scientific activities and granulometric analysis was supported by the Kazan Federal University Strategic Academic Leadership Program (PRIORITY-2030).

For citation: Yusupova A.R., Nurgalieva N.G., Rogov A.M. Mineral composition of lake Sabakty sediments as an indicator of paleoclimate, Southern Urals, Russia. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 8, pp. 77–90. DOI: 10.18799/24131830/2024/8/4403

Введение

Известно, что донные отложения современных озер являются наиболее информативными архивами климатических данных. Характер озерного осадкообразования, чувствительного к изменениям климата и других факторов окружающей среды определяет разнообразие вещественного состава донных отложений, открывая большие возможности для литолого-генетических палеореконструкций.

Седиментация в малых озерах обладает рядом характерных черт, в частности богатством минеральных фаз, которые могут отложиться за короткое время в небольшом по площади и глубине бассейне. Образование минералов in-situ как под влиянием химизма среды, так и при участии биологиче-

ских агентов, является важной частью геохимического цикла, а структурные и кристаллохимические особенности продуктов аутигенного минералообразования представляют собой надежные индикаторы климатических обстановок, в которых этот процесс протекает. Оптимальными объектами для подобных исследований считаются плейстоцен-голоценовые отложения малых минеральных озер [1]. Таким образом, в донных отложениях озер формируется уникальный архив данных об изменениях природных процессов прошлого.

Изучение минерального состава донных отложений озер позволяет оценить величину терригенного сноса, колебания уровня и продуктивность озер, так как изменения содержания аллотигенных

минералов в сапропеле свидетельствуют о колебаниях уровня озера [2]. Аллотигенные минералы в осадочных отложениях образуют определенные, часто весьма характерные ассоциации, состав которых отражает состав пород питающей провинции или источника сноса обломочного материала [3]. Аутигенные минералы являются индикаторами физико-химических условий среды. Многие аутигенные минералы осадочных пород могут быть индикаторами среды образования, показывающими значение pH, Eh, степень солености вод бассейна и т. д. [3–5].

Полнота и детальность реконструкций условий формирования отложений определяется числом объектов и получением большего числа записей разных литологических данных. Это актуально для территории Южного Урала, где изучены единичные озера [6].

Ряд работ посвящен изучению вещественного состава озерных отложений, а также палеоклиматическим реконструкциям Урала с помощью спорово-пыльцевого анализа торфяных отложений, например, [7]. Урал рассматривается как климато-раздел [8], поэтому исследования условий озерного седиментогенеза, в том числе климатических, особенно актуальны на данной территории.

Наличие достаточно мощных донных осадков (более 7 м) [9] установлено в озере Сабакты (53°37'0,78" с.ш.; 58°39'36,1" в.д.), которое расположено в срединной части Башкирского Зауралья.

Озеро Сабакты впервые специально изучалось в работе [10]. В данной работе состав донных отложений охарактеризован в пределах не более 50–60 см верхней части ила как однообразный по толщине, дисперсности, цвету и органолептическим показателям, за исключением прибрежной полосы восточной части озера (в пределах 50–100 м от берега), где дно представлено слегка заиленным песчано-гравийным слоем черноватого цвета. При этом какие-либо данные по вещественному составу рассмотренных донных отложений здесь не получены.

В работе [11] изучен керн донных отложений озера Сабакты мощностью 1,68 м. Геохимический анализ осадков озера позволил провести реконструкцию условий осадконакопления в позднечетвертичное время. Также, согласно проведенным реконструкциям электропроводности, авторам работы удалось установить, что в течение конца плейстоцена-голоцена соленость озера Сабакты изменялась [11].

В работе [12] представлены результаты комплексирования данных лабораторных исследований (радиоуглеродное датирование, гранулометрический анализ, измерение магнитной восприимчивости, коэрцитивная спектрометрия, дифференциальный термоманитный анализ, рентгенофлуорес-

центный и ИСП-МС анализ). В работе представлена литологическая зональность керна донных отложений озера Сабакты длиной ~3 м, возраст которой составляет ~25 тыс. лет. Выделены одна плейстоценовая зона и четыре голоценовые литологические зоны, отражающие историю осадконакопления в изучаемом водоеме. Авторами указанной работы обозначены наиболее значительные эпизоды и события в истории осадконакопления.

Целью данной работы является изучение особенностей минерального состава осадков озера Сабакты.

Полученные данные позволят развить и дополнить общие и региональные представления об условиях озерного осадконакопления.

Характеристика объекта исследования

Бессточноеzero Сабакты (53°36'55" с.ш.; 58°39'22" в.д.) имеет следующие морфометрические параметры: площадь – 2,4 км², длина – 2,3 км, средняя ширина – 1 км, средняя глубина – 2,8 м; максимальная глубина – 6 м, объем воды – 5,1 млн м³; площадь водосбора – 9,0 км² [13]. Берега озера преимущественно пологие. Чаша озера имеет блюдцеобразную форму с относительно медленным нарастанием глубин в западной и юго-западной частях котловины и более быстрым нарастанием глубин у восточного и северо-восточного берегов [10].

Согласно данным радиоуглеродного датирования возраст изучаемых отложений составляет не менее 25 тыс. лет [12].

Материал и методы исследования

Для хронологической оценки и подробного изучения гранулометрического и минерального состава была опробована керновая колонка 4К длиной 298 см, отобранная в центральной части оз. Сабакты в августе 2019 г. с глубины ~6 м [9].

Отбор образцов для различных методов исследования проводился пробоотборником, подробно описанным в [14] с учетом сейсмоакустических данных (выбран участок ненарушенной слоевой ассоциации), литологической неоднородности (по данным первичного описания керна в полевых условиях и экспрессного измерения магнитной восприимчивости [12, 15] и данных радиометрического датирования [12]).

Все виды исследований (кроме радиометрического датирования) осуществлены в Институте геологии и нефтегазовых технологий Казанского федерального университета.

Гранулометрический анализ проводился методом лазерной гранулометрии с использованием анализатора размера частиц Bluewave (Microtrac, США), совмещенного с системой загрузки и цир-

куляции пробы с интегрированным ультразвуковым диспергатором. Предварительно были обработаны образцы 10 %-й HCl и 30 %-й H₂O₂ для удаления карбонатов и органического вещества. Для определения литологических разностей использована классификация нелитифицированных осадков по [3]. При обработке данных гранулометрического состава строились графики распределения содержаний фракций (гистограммы и кумулятивные кривые) и использовался медианный размер зерен (M_d), рассчитываемый квантильным методом, тесно связанный с коэффициентом сортировки и отражающий гидродинамический уровень осадкообразования и аккомодацию [16, 17].

Электронная микроскопия была проведена на базе Междисциплинарного центра «Аналитическая микроскопия» КФУ. С целью изучения морфологии и элементного состава минеральных частиц донных отложений использовался автоэмиссионный сканирующий электронный микроскоп Merlin компании Carl Zeiss (Германия), оснащенный детектором элементного анализа Aztec X-MAX. Разрешение составляет 127 эВ.

Рентгеновский дифракционный анализ (X-Ray diffraction analysis) использовался для определения минерального состава осадочных отложений. Анализ был проведен при помощи рентгеновского дифрактометра D2 PHASER. В ходе исследований были получены дифрактограммы исследуемых образцов. Определены кристаллические фазы (силикаты, алюмосиликаты, водные силикаты, ферросиликаты, оксиды, сульфиды, сульфаты, карбонаты) и их процентное содержание. Минеральный состав представлен аллотигенной (привнесенной) и аутигенной (биогеоморфной) составляющими осадочных образований.

Результаты

Гранулометрический анализ. Отложения нижней части колонки сложены голубовато-серым суглинком (интервал 290–216 см) и сменяются вверх по разрезу темно-зеленым суглинком алевритовым с прослойками супеси алевритовой и алевритистого песка (рис. 1). Включения галечно-гравийного материала характерно для интервала 246–256 см. Наличие раковинного детрита зафиксировано в интервале 132–226 см [12].

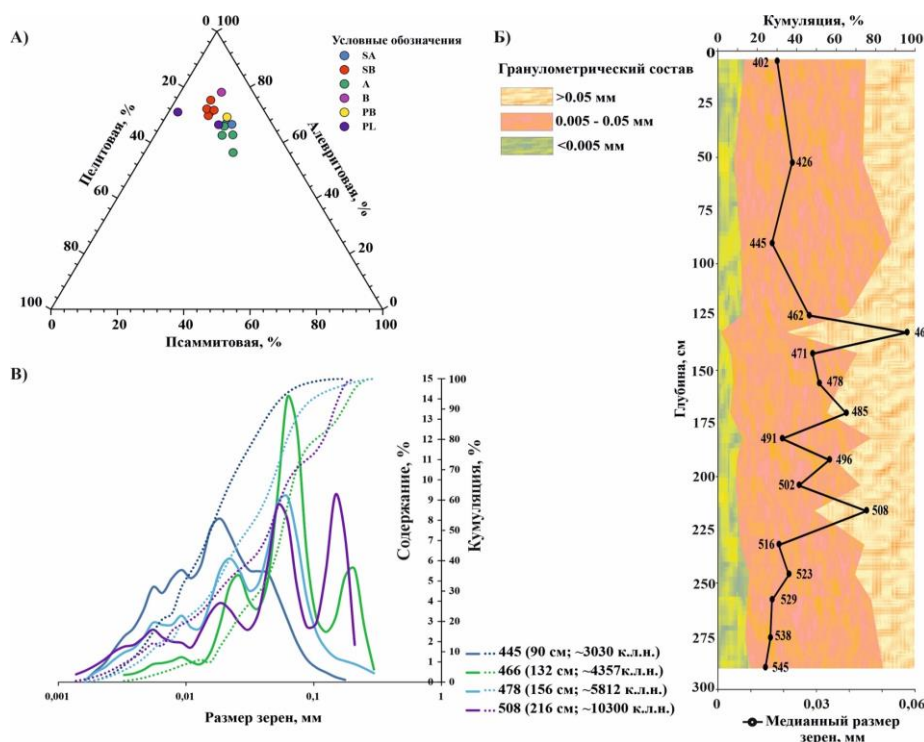


Рис. 1. А) треугольная диаграмма, отображающая распределение гранулометрического состава (пелитовая фракция, %; алевритовая фракция, %; псаммитовая фракция, %); Б) распределение гранулометрического состава (M_d , мм; глина, %; алеврит, %; песок, %); В) примеры графиков распределения содержания зерен по размеру частиц (гистограмма (сплошная линия) и кумулятивный график (пунктирная линия)) для образцов № 445 (суглинок алевритовый), № 478 (супесь алевритовая), № 508 (суглинок) и № 466 (алевритовый песок)

Fig. 1. А) triangle diagram showing the distribution of granulometric composition (clay, %; silt, %; sand, %); Б) distribution of granulometric composition (M_d , mm; clay, %; silt, %; sand, %); В) examples of graphs of grain content distribution by particle size (histogram (solid line) and cumulative graph (dotted line)) for samples no. 445 (siltstone loam), no. 478 (siltstone sandy loam), no. 508 (loam) and no. 466 (siltstone sand)

По разрезу устанавливается преобладание алевритовой фракции (рис. 1, А, Б), содержание которой изменяется в интервале от 33,24 до 76,3 % со средним значением 58,14 %. Содержание пелитовой фракции (размер зерен <0,005 мм) изменяется в диапазоне от 1,37 до 16,41 % со средним значением 10,63 %. Содержание псаммитовой (песчаной) фракции изменяется от 12,02 до 65,39 % со средним значением 31,22 %. Медианный размер (M_d) зерен изменяется в пределах 0,014–0,056 мм со средним значением 0,0258 мм [12] (рис. 1, Б).

На рис. 1, В показано распределение зерен (гистограмма и кумулятивная кривая) в типичном суглинке алевритовом (90 см, ~3030 к.л.н.) – преобладающей литологической разности разреза, а также в супеси алевритовой (156 см, ~5812 к.л.н.), суглинке (216 см, ~10300 к.л.н.) и алевритовом песке (132 см, ~4357 к.л.н.).

Минеральный состав. Результаты рентгенодифрактометрии показали, что минеральный состав характеризуется преобладанием в осадках (28–96 % (среднее 77 %) минерального состава) аллотигенных минералов (кварц, микроклин, альбит, слюда, хлорит, смешаннослойные глинистые минералы, роговая обманка, каолинит).

Аутигенные минералы включают биогенный кремнезем (кристобалит, тридимит), пирит, карбонаты (кальцит, доломит), гипс, барит.

Содержание биогенного кремнезема (кристобалит, тридимит) [18, 19], который идентифицируется на электронно-микроскопических снимках в составе панцирей диатомей и стоматоцист, изменяется в пределах 3–26 % (рис. 2).

Последние имеют сферическую форму в основном с гладкой поверхностью размером 5–10 мкм с достаточно хорошей сохранностью (рис. 2).

В осадках оз. Сабакты содержание пирита изменяется в диапазоне от 0,55 до 8,44 % со средним значением 1,34 %. В осадках установлено присутствие фрамбоидального пирита и отдельных кубических кристаллов пирита (рис. 3).

Содержание карбонатов характеризуется реверсивным, по отношению к содержанию аллотигенных минералов, изменением по разрезу в пределах 2–71 % при среднем значении 9–13,76 %. Минеральный состав карбонатной компоненты оз. Сабакты характеризуется чередованием кальцитовых (рис. 4, А) и кальцит-доломитовых композиций (рис. 4, Б).

Содержание кальцита в осадочных отложениях озера изменяется в широком диапазоне от 1 до 69 %, содержание доломита варьирует от 0,57 до 3,78 % при среднем значении 1,66 %.

Кальцит, содержащий в примесях Mg, Mn и Sr, по данным СЭМ установлен в виде блочных кристаллов с размером зерен <10 мкм (рис. 5).

Доломит в осадках оз. Сабакты был установлен в двух основных формах (рис. 6, 7). Ромбоэдрический доломит был зафиксирован в виде хорошо сформированного субидiomорфного кристалла (~3 мкм) (рис. 6).

Также доломит был установлен в виде дисперсных кристаллов, прикрепленных к поверхности других минералов с зернами менее 2 мкм (рис. 7) и агрегированных в кластеры (рис. 7).

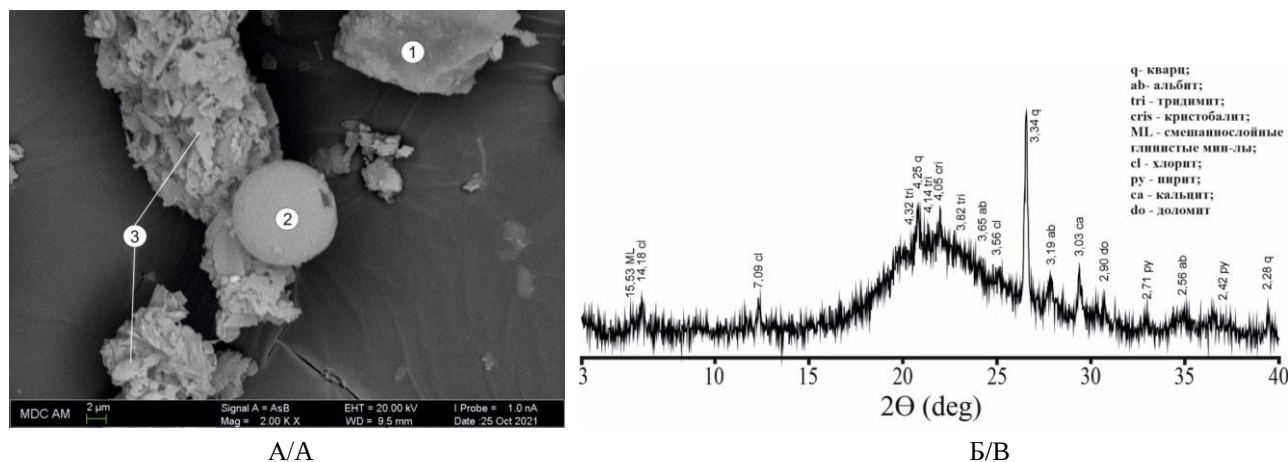


Рис. 2. Минеральный состав осадков оз. Сабакты на примере интервала 90 см (~3030 к.л.н.): А) электронно-микроскопические снимки: обломочный кварц – энергодисперсионный спектр (1), стоматоцисты, на врезках – энергодисперсионный спектр (2), панцири диатомей (целые створки и фрагменты) (3); Б) дифракционный спектр минерального состава осадков с выраженной рентгеноаморфной фазой (86 см; ~2940 к.л.н.)

Fig. 2. Mineral composition of Sabakty Lake sediments. An interval of 90 cm (~3030 BP): А) electron microscopic images: detrital quartz – energy dispersion spectrum (1), stomatocysts, on insets – energy dispersion spectrum (2), shells of diatoms (whole leaves and fragments) (3); Б) diffraction spectrum of the mineral composition of sediments with a pronounced X-ray amorphous phase (86 cm; ~2940 BP)

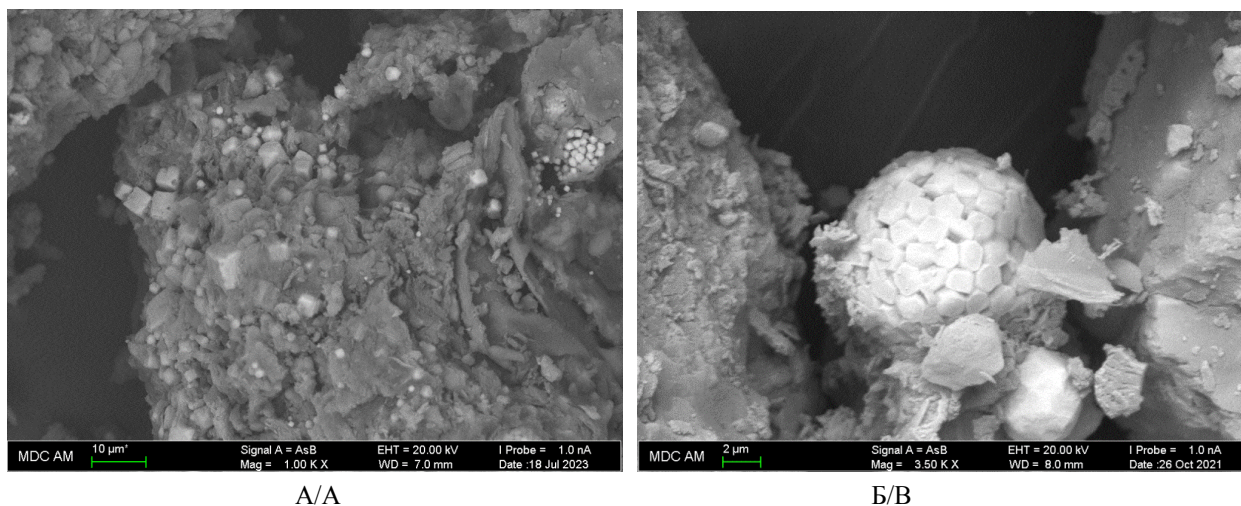


Рис. 3. А) электронно-микроскопический снимок фрамбоидального пирита (190 см; ~2160 к.л.н.); Б) электронно-микроскопический снимок фрамбоидального пирита (отметка 170 см; ~6750 к.л.н.) (атом. % Si – 5,62, O – 33,71, Al – 1,51, Cu – 2,17, Fe – 49,69)
Fig. 3. A) electron microscopic image of framboidal pyrite (190 cm; ~2160 BP); B) electron microscopic image of framboidal pyrite (170 cm; ~6750 BP) (atom. % Si – 5,62, O – 33,71, Al – 1,51, Cu – 2,17, Fe – 49,69)

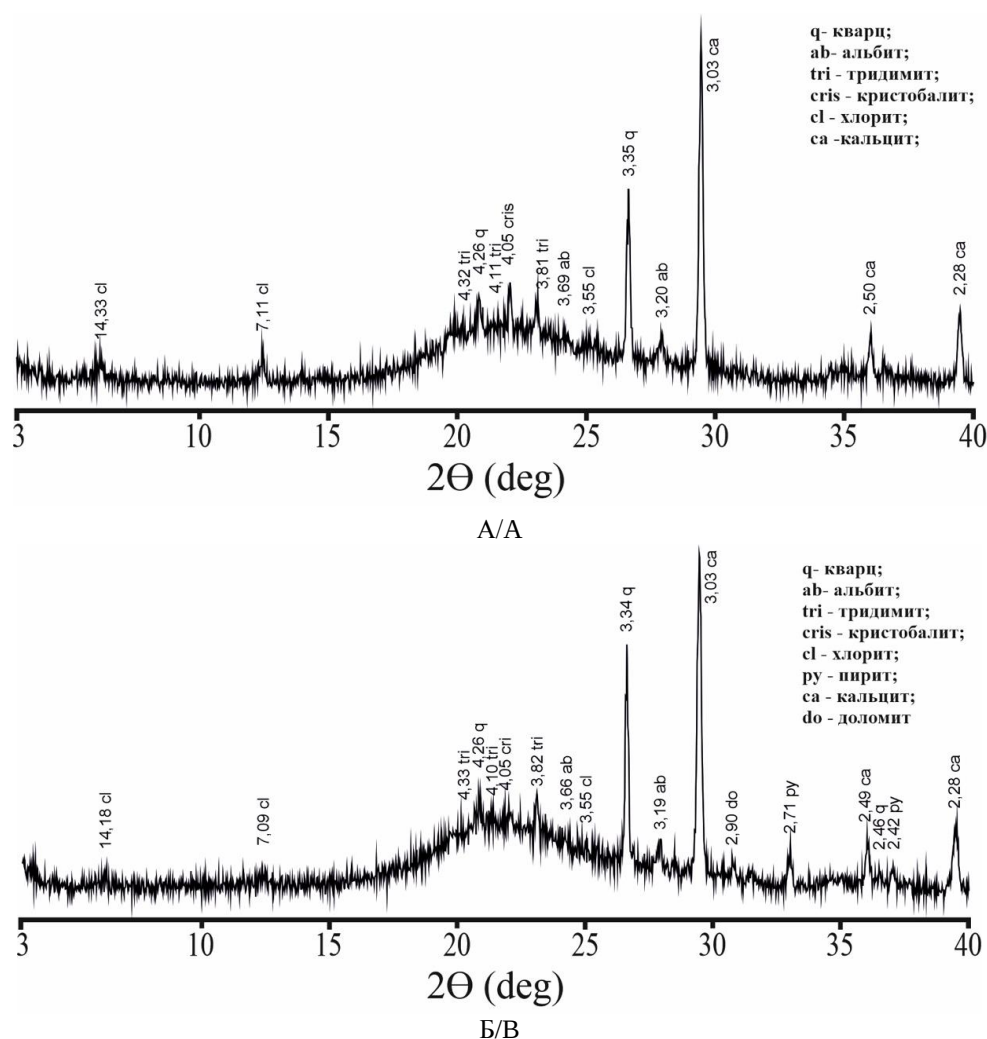
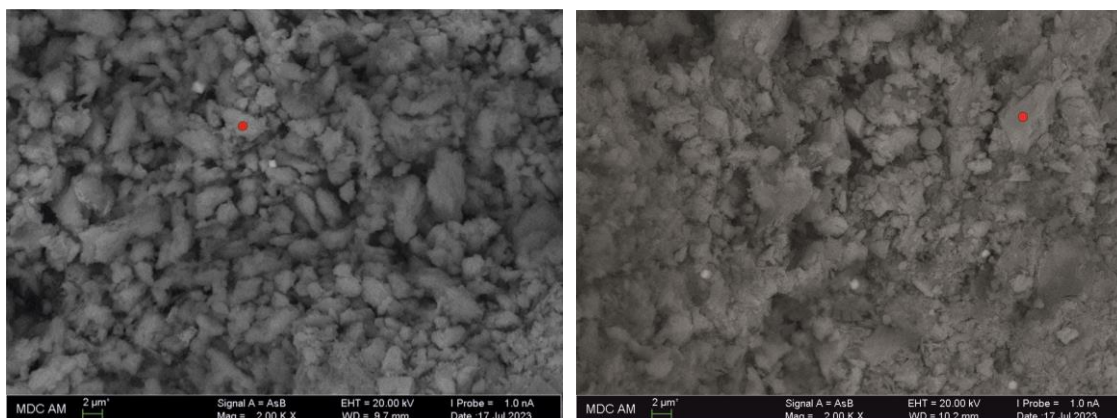


Рис. 4. Дифрактограммы донных отложений оз. Сабакты: А) отметка 46 см (~1372 к.л.н.); Б) отметка 166 см (~6472 к.л.н.)
Fig. 4. Diffractograms of Sabakty Lake sediments: A) depth is 46 cm (~1372 BP); B) depth is 166 cm (~6472 BP)



А/А

Б/Б

Рис. 5. Электронно-микроскопический снимок кальцита, 154 см, ~5700 кл.н.: А) атом. % Ca – 8,69, Mg – 0,47; O – 38,87, C – 50,87; Mn – 0,05, Si – 0,44; Al – 0,24, S – 0,23, Fe – 0,08; Б) атом. % Ca – 10,86, Mg – 0,65; O – 61,53, C – 25,70; Sr – 0,03, Si – 0,64; Al – 0,23, S – 0,21, Fe – 0,11

Fig. 5. Electron microscopic image of calcite, 154 cm, ~5700 BP; А) atom. % Ca – 8,69, Mg – 0,47; O – 38,87, C – 50,87; Mn – 0,05, Si – 0,44; Al – 0,24, S – 0,23, Fe – 0,08; Б) atom. % Ca – 10,86, Mg – 0,65; O – 61,53, C – 25,70; Sr – 0,03, Si – 0,64; Al – 0,23, S – 0,21, Fe – 0,11

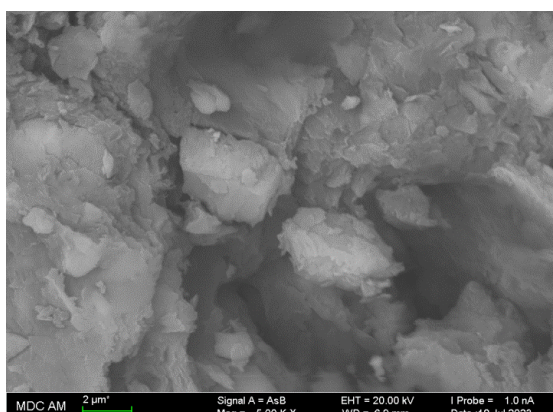
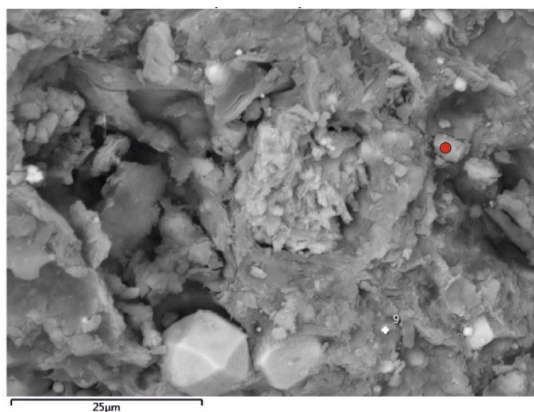


Рис. 6. Электронно-микроскопический снимок доломита (отметка 190 см; ~8164 кл.н.; атом. % Ca – 3,52, Mg – 3,73; O – 46,63, C – 43,74; Si – 5,17; Al – 0,59, S – 0,98, Fe – 0,23)

Fig. 6. Electron microscopic image of dolomite (depth is 190 cm; ~8164 BP; atom. % Ca – 3,52, Mg – 3,73; O – 46,63, C – 43,74; Si – 5,17; Al – 0,59, S – 0,98, Fe – 0,23)

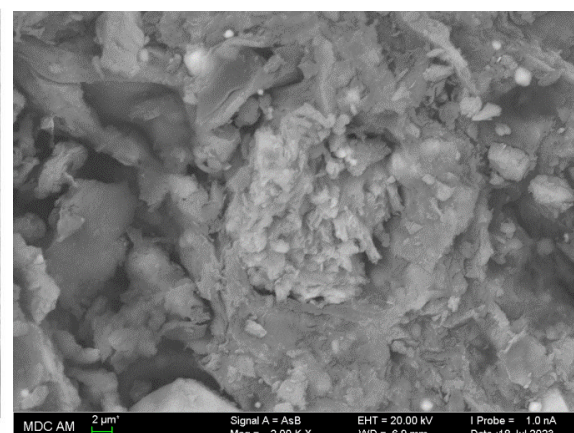
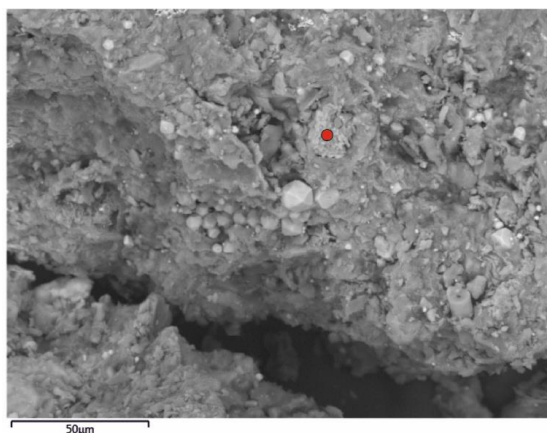


Рис. 7. Электронно-микроскопический снимок доломита (отметка 190 см; ~8164 кл.н.; атом. % Ca – 2,40, Mg – 1,94; O – 56,57, C – 29,54; Si – 4,37; Al – 1,93, Ti – 1,98, Fe – 1,27)

Fig. 7. Electron microscopic image of dolomite (depth is 190 cm; ~8164 BP; atom. % Ca – 2,40, Mg – 1,94; O – 56,57, C – 29,54; Si – 4,37; Al – 1,93, Ti – 1,98, Fe – 1,27)

На отметках 72, 172 и 212 см зафиксировано присутствие гипса с содержаниями 8,45, 5,91 и 11,85 % соответственно (рис. 8).

Методом СЭМ подтверждено наличие кристаллов гипса в осадках (рис. 9).

Методом СЭМ также удалось зафиксировать присутствие барита (рис. 10) на отметке 182 см (~7600 к.л.н.).

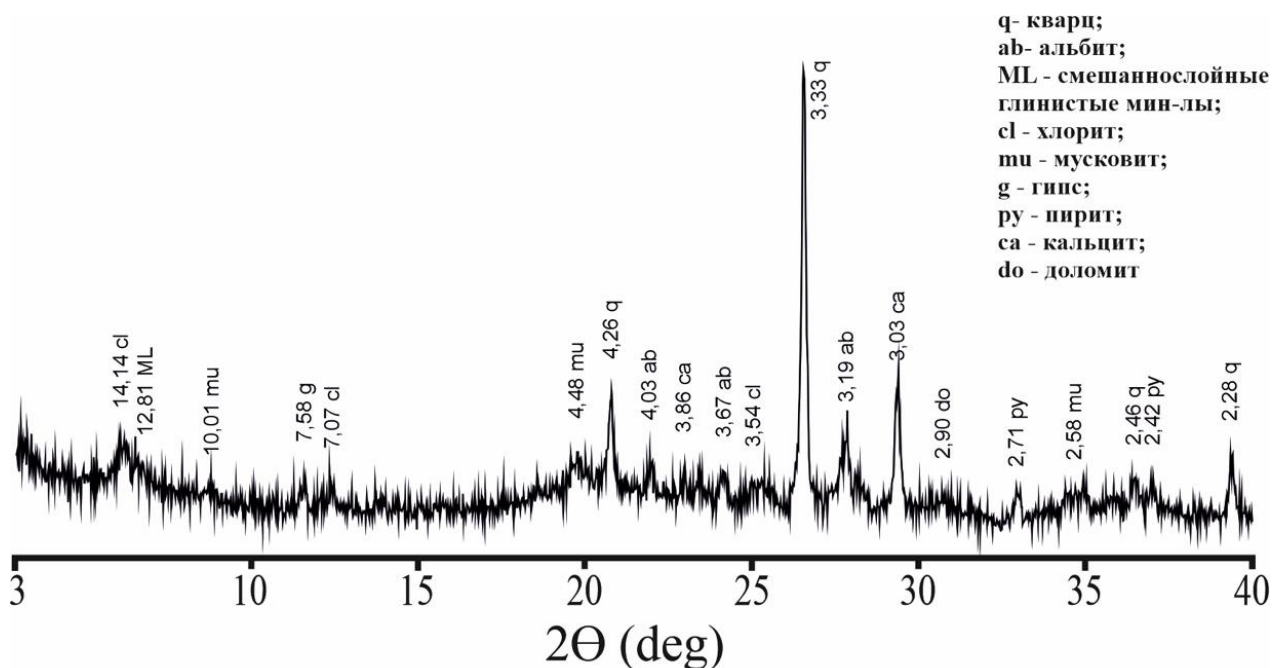
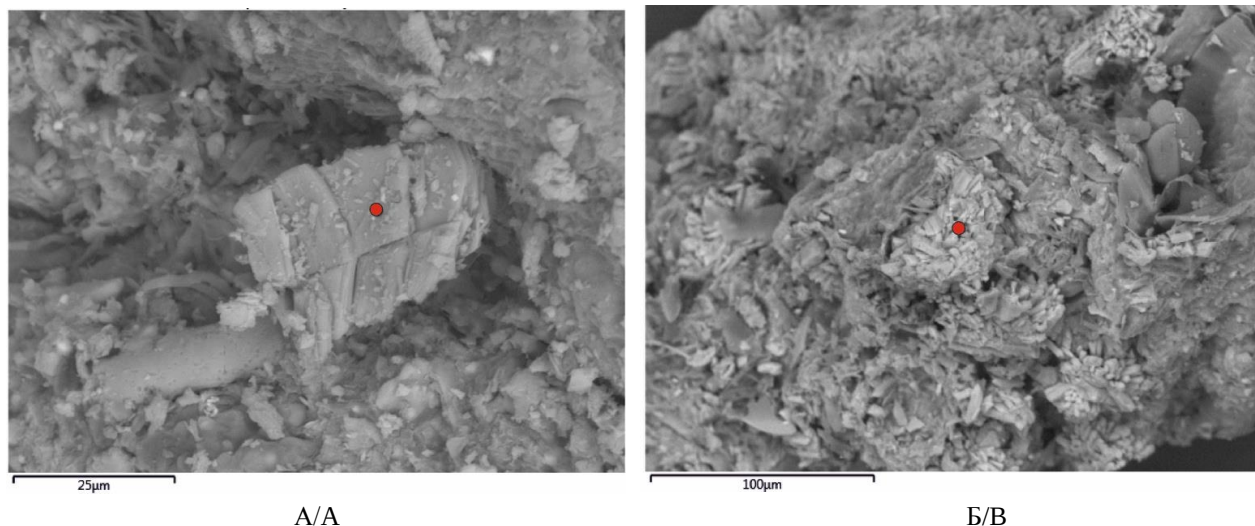


Рис. 8. Дифрактограмма донных отложений оз. Сабакты – отметка 172 см (~6890 к.л.н.)

Fig. 8. Diffractogram of Lake Sabakty sediments – depth is 172 cm (~6890 BP)



А/А

Б/Б

Рис. 9. А) электронно-микроскопический снимок гипса в образце 506 оз. Сабакты (212 см; 9973 к.л.н., атом. % Ca – 14,09; S – 14,40; O – 70,39, Si – 0,45, Al – 0,24, Fe – 0,26); Б) электронно-микроскопический снимок гипса в образце 436 оз. Сабакты (72 см; 2440 к.л.н. атом. % Ca – 21,21; S – 16,65; O – 61,03, Si – 0,55, Al – 0,21, Fe – 0,18)

Fig. 9. А) electron microscopic image of gypsum in a sample of 506 (depth is 212 cm; 9973 BP, atom. % Ca – 14,09; S – 14,40; O – 70,39, Si – 0,45, Al – 0,24, Fe – 0,26); Б) electron microscopic image of gypsum in a sample of 436 (depth is 72 cm; 2440 BP. atom. % Ca – 21,21; S – 16,65; O – 61,03, Si – 0,55, Al – 0,21, Fe – 0,18)

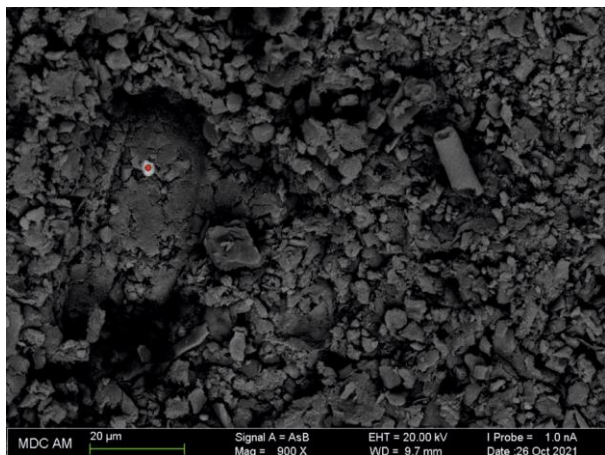


Рис. 10. Электронно-микроскопический снимок барита в образце 491 (глубина 182 см, ~7600 к.л.н.) оз. Сабакты, атом. Ва – 22,11, О – 25,23, Si – 16,68, Al – 4,23, Fe – 3,45, S – 3,92, Na – 1,90)

Fig. 10. Electron microscopic image of barite in sample 491 (depth is 182 cm, ~7600 BP), atom. Ba – 22,11, O – 25,23, Si – 16,68, Al – 4,23, Fe – 3,45, S – 3,92, Na – 1,90)

Обсуждение результатов

Для описания событий, произошедших в позднем плейстоцене–голоцене, была использована литологическая зональность, представленная в работе [12].

Плейстоценовая литологическая зона оз. Сабакты относится к интервалу разреза 294–238 см, ~26000–11700 к.л.н. По данным первичного литологического описания изучаемые образцы представлены глинистыми отложениями серо-голубыми плотными с включениями галечно-гравийного материала. Среднее значение M_d в данной зоне составило 0,017 мм. В образцах преимущественно содержится алевроитовая фракция: среднее значение составило 62,80 %. В меньшей степени в образцах установлено содержание пелитовой (среднее значение – 15,18 %) и псаммитовой (среднее значение – 22,02 %) фракций. По классификации Н.В. Логвиненко определен суглинок легкий, алевроитовый [12]. Для данной зоны характерно повышенное содержание аллотигенных минералов (до 87 %). Карбонатные минералы преимущественно представлены кальцитом, содержание которого изменяется в пределах 11,94–33,96 %. Содержание пирита малозначительно (среднее содержание 1,22 %).

Таким образом, начальный этап осадконакопления характеризуется постепенно растущим накоплением терригенных осадков с существенной карбонатностью. Кальцит-доломитовый состав карбонатной компоненты озера Сабакты указывает на то, что озеро было мелководным и минерализованным вследствие аридизации климата, включавшей, вероятно, и глобальное событие Бонда 8 [20–22]. Вариации в разрезе значений изотопных отношений

$^{18}\text{O}_{\text{карб}}$, $^{13}\text{C}_{\text{карб}}$ [23] подтверждают выводы, сделанные на основании изучения карбонатной записи.

Накопление карбонатных минералов, вероятно, происходило согласно биохемогенному механизму, где в условиях локальных пересыщений за счет смещения карбонатного равновесия при фотосинтезе в зарослях водной растительности может происходить их осаждение [24]. Также известно, что при регуляции микробного метаболизма доломит может образовываться не только в средах с высокой соленостью [25–27], но и в озерных водах с низкой соленостью [28] или даже в пресной воде [29, 30]. Следовательно, вездесущие микроорганизмы могут играть важную роль в образовании доломита [31].

В работе [11] по результатам геохимического анализа и количественных реконструкций установлено, что >12000–11600 к.л.н. озеро представляло собой слабосоленоватый водоем, что подтверждает аридность климата в рассматриваемый период.

К литологической голоценовой зоне I приурочен интервал 238–214 см (~11700–10130 к.л.н.), сложенный илом светло-серым и темно-зеленым, плотным, глинистым. Среднее значение M_d для осадочных отложений оз. Сабакты в данной зоне составило 0,031 мм. Преимущественно в образцах содержится алевроитовая фракция: среднее значение составило 50,85 %. В меньшей степени в образцах установлено содержание пелитовой (среднее значение – 10,78 %) и псаммитовой (среднее значение – 38,38 %) фракций. По классификации Н.В. Логвиненко определены суглинок легкий алевроитовый (глубина 232 см) и суглинок легкий (глубина 216 см) [12]. Среднее содержание аллотигенных минералов в осадочных отложениях озера Сабакты составило 76,25 %, а карбонатов – 22,54 %. Карбонатные минералы представлены кальцитом и доломитом, их среднее содержание составляет 21,78 и 1,14 %. Также в осадочных отложениях присутствует пирит (среднее содержание 3,55 %), а на глубине 226 см установлено присутствие биогенного кремнезема (кристобалит и тридимит), содержание которого составило 2,55 %. Постепенное увеличение значений изотопных отношений $^{18}\text{O}_{\text{карб}}$, $^{13}\text{C}_{\text{карб}}$ [23] указывает на снижение влажности климата. Рассматриваемая литологическая зона также характеризуется колебаниями содержаний аллотигенного и карбонатного вещества, указывая на чередование увеличения/уменьшения влажности климата. Согласно результатам А.В. Масленниковой [11], начало голоцена характеризуется колебаниями электропроводности вод озера Сабакты, что указывает на колебания уменьшения/увеличения влажности климата.

Литологическая голоценовая зона 2 охватывает интервал разреза 214–178 см (~10130–7300 к.л.н.).

Согласно первичному литологическому описанию, интервал представлен илом светло-коричневым плотным, песчано-алевритовым. Среднее значение M_d составило 0,025 мм. Содержание алевритовой фракции составило 59,35 %, псаммитовой – 30,38 %, пелитовой – 10,27 %. По классификации Н.В. Логвиненко определены супесь алевритовая (интервал 204–192 см) и суглинок легкий алевритовый (глубина 182 см) [12]. Среднее содержание аллотигенных минералов возрастает до 87,84 %, при этом среднее содержание карбонатной компоненты резко снижается до 4,29 %. Карбонатные минералы представлены кальцитом (среднее 6,62 %) и доломитом (среднее 2,07 %). Содержание биогенного кремнезема и пирита растет, их средние значения составили 4,71 и 5,52 % соответственно. Также на глубине 212 см установлено наличие гипса, содержание которого составило 11,85 %.

Повышенное содержание аллотигенных минералов в осадке указывает на увеличение влажности климатических условий. Однако выделяются эпизоды аридизации климата, которые устанавливаются благодаря присутствию в осадках эвапоритов (гипс, барит).

Известно, что растворимые сульфаты кальция (гипс), выпадают при большем выпаривании растворов, которое осуществляется в ограниченных водоемах, то больших по площади, то меньших, почти всегда мелководных. Установлено, что для осаждения гипса в воде необходимо содержание, в определенных концентрациях, растворенных сульфатов, кальция и сероводорода. Несмотря на то, что в основном гидраты сульфата кальция образуются в водоемах с соленой водой, необходимые для его минерализации компоненты могут также быть обусловлены обилием органического материала. Так, основной компонент – сероводород – образуется в дезоксигенированных участках озер, как правило, после значительного понижения содержания кислорода в результате разложения биологического материала [32].

Таким образом, присутствие гипса на 212 см (~10000 к.л.н.), а также барита на глубине 182 см (~7600 к.л.н.) в осадках озера Сабакты свидетельствует об аридизации климата. Аридизацию климата подтверждают повышенные значения изотопных отношений $^{18}O_{\text{карб}}$, $^{13}C_{\text{карб}}$ [23].

К литологической голоценовой зоне 3 приурочен интервал разреза 178–60 см (~7300–1950 к.л.н.), сложенный илом темно-зеленым, серо-зеленым и зеленым плотным, участками песчано-алевритовым. Среднее значение M_d зерна по сравнению с зоной 2 увеличивается до 0,033 мм. Для данной зоны характерно увеличение содержания псаммитовой фракции (среднее значение составило 37,22 %). Средние содержания алевритовой и пели-

товой фракций снижаются до 55,11 и 7,67 % соответственно. По классификации Н.В. Логвиненко определены супесь алевритовая (170–156 см), алевритовый песок (132 см) и суглинок легкий алевритовый (124–90 см) [12]. Среднее содержание аллотигенных минералов составляет 71,77 %, карбонатных минералов – 24,03 %. Для данной литологической зоны характерно увеличение содержания биогенного кремнезема до 13,85 % и уменьшение среднего содержания пирита до 2,91 %. Также на глубинах 172 и 72 см установлено наличие гипса, содержание которого составило 5,91 и 8,45 %.

В осадках озера Сабакты отмечается яркий эпизод уменьшения влажности климата в интервале ~7300–5200 к.л.н., для которого характерно увеличение карбонатности до 70 %. Данное событие подтверждается наличием гипса на отметке ~6900 к.л.н (172 см). Согласно Н.А. Хотинскому [33], в период ~6800–5800 л.н. на территории Северной Евразии произошел термический максимум. Полученные данные согласуются с региональными данными по оз. Сырыткуль [34], палеопочвам [35]. Для озер Южного Урала установлено возрастание электропроводности в период ~6500–5500 к.л.н., а также снижение содержания пылицы ели [11], что свидетельствует об уменьшении влажности климата. Также установлено, что в период ~5500–5000 к.л.н. доля карбонатной компоненты для озера Сабакты снижается, при этом доля аллотигенной компоненты увеличивается, что может указывать на уменьшение сухости и/или похолодание климата, что согласуется с [8, 11]. Присутствие гипса на глубине 72 см (~2440 к.л.н.) может указывать на аридизацию климата. Согласно Н.А. Хотинскому [33], в период ~4700–3600 л.н. на территории Северной Евразии произошел термический максимум. Данное событие отмечается в оз. Сабакты и сопровождается резким увеличением M_d , содержания псаммитовой фракции, положительными отклонениями $\delta^{18}O_{\text{карб}}$ и $\delta^{13}C_{\text{карб}}$, [23], а также уменьшением k_{para} [12].

Литологическая голоценовая зона 4 охватывает интервал разреза 60–2 см (~1950–1000 к.л.н.), представленный илом темно-зеленым. Среднее значение M_d в осадочных отложениях оз. Сабакты уменьшается по сравнению с зоной 3 до 0,020 мм. Среднее содержание алевритовой фракции составило 63,39 %, пелитовой – 10,84 %, псаммитовой – 25,76 %. По классификации Н.В. Логвиненко определены супесь алевритовая (52 см) и суглинок легкий алевритовый (4 см) [12]. Содержание аллотигенных минералов изменяется от 41,51 до 81,00 %, среднее содержание карбонатных минералов составляет 28,84 %. Для данной литологической зоны характерно увеличение содержания биогенного кремнезема до 25,70 % и уменьшение среднего содержания пирита до 1,80 %.

На отметке 46 см (~1400 к.л.н.) в осадке озера Сабакты содержание кальцита составило 52 % и доломита ~4 % на глубине 56 см (~1900 к.л.н.) в осадках оз. Сабакты, что совпадает с событием Бонда 1 (увеличение сухости климата). На этом этапе, вероятно, произошло сокращение аккомодации водоема, что подтверждается увеличением значений $\delta^{18}\text{O}_{\text{карб}}$ и $\delta^{13}\text{C}_{\text{карб}}$ в осадочных отложениях оз. Сабакты в интервале ~1900–1200 к.л.н. [23].

Заключение

По разрезу установлено преобладание алевроитовой фракции.

Соотношение аллотигенной и аутигенной составляющих отражает климатически обусловленные изменения аккомодации водоема и поставки кластического материала.

Изменения влажности климата находят отклик в изменениях содержаний карбонатных и сульфатных минералов.

Во время начального этапа осадконакопления (~26000–11700 к.л.н.) озеро Сабакты было мелководным и минерализованным вследствие аридизации климата, включавшей, вероятно, и глобальное событие Бонда 8.

Изучение минерального состава осадков озера Сабакты позволило установить события аридизации климата: ~10000 к.л.н., ~7600 к.л.н., ~6900 к.л.н., ~1900 к.л.н. и ~1400 к.л.н.

В осадках озера Сабакты отмечается яркий эпизод уменьшения влажности климата в интервале ~7300–5200 к.л.н., который характеризуется увеличением карбонатности осадков до 70 % и обнаружением гипса на отметке ~6900 к.л.н.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Smoot J.P., Lowenstein T.K. Depositional environments of non-marine evaporates // *Evaporites, Petroleum and Mineral Resources* / Ed. by J.L. Melvi. – New York: Elsevier, 1991. – P. 189–348.
2. Реконструкция обстановок озерного седиментогенеза в позднеледниковье и голоцене Среднего Урала / А.В. Масленникова, В.Н. Удачин, Д.В. Пирогов, П.В. Хворов // *Литосфера*. – 2016. – № 6. – С. 166–176.
3. Логвиненко Н.В. Петрография осадочных пород с основами методики исследования. – М.: Высшая школа, 1984. – 416 с.
4. Mineralogical and mineral composition analysis of lacustrine sediments from Lake Toson, NE Qinghai-Tibet Plateau, China / A. Cheng, J. Yu, Ch. Gao, L. Zhang // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2021. – Vol. 783. – P. 1–5.
5. Microbial diversity and authigenic mineral formation of modern bottom sediments in the littoral zone of Lake Issyk-Kul, Kyrgyz Republic (Central Asia) / S. Krivonogov, A. Maltsev, D. Zelenina, A. Safonov // *Biology*. – 2023. – Vol. 12. – № 5. – P. 1–19.
6. Дерягин В.В., Масленникова А.В., Колодич О.П. Ландшафт водосбора озера Уфимское (Южный Урал) на временных срезах голоцена // *Ландшафтоведение и ландшафтная экология: коадаптация ландшафта и хозяйственной деятельности: материалы Междунар. науч.-практ. конф.* – Симферополь, 2020. – С. 246–251.
7. Панова Н.К. История лесной и болотной растительности центральной горной провинции Южного Урала в голоцене: по данным спорово-пыльцевого анализа торфа: дис. ... канд. биол. наук. – Свердловск, 1986. – 183 с.
8. Масленникова А.В., Удачин В.Н., Дерягин В.В. Палеоэкология и геохимия озерной седиментации голоцена Урала. – Екатеринбург: РИО УрО РАН, 2014. – 136 с.
9. High-resolution seismic studies of shallow Lake Sabakty (Russia) / P.S. Krylov, D.K. Nurgaliev, D.M. Kuzina, P.G. Yasonov // *19th SGEM International Multidisciplinary Scientific GeoConference EXPO Proceedings*. – Sofiya, 2019. – Vol. 19. – № 4.2. – P. 229–234.
10. Шевченко А.М., Островская Ю.В. Эколого-фаунистическая характеристика сообществ макробеспозвоночных озера Сабакты (Южное Зауралье, Республика Башкортостан) // *Материалы по флоре и фауне Республики Башкортостан*. – 2018. – № 19. – С. 147–158.
11. Геохимическая летопись озера Сабакты: количественная оценка электропроводности вод и реконструкция обстановок осадконакопления позднеледниковья и голоцена степной зоны Южного Урала / А.В. Масленникова, Д.А. Артемьев, Э.П. Зазовская, В.В. Дерягин, В.О. Гулаков, Н.В. Удачин, П.Г. Аминов, В.Н. Удачин // *Литосфера*. – 2023. – Т. 23. – № 3. – С. 410–429.
12. Особенности вещественного состава донных отложений озера Сабакты (Южный Урал) / А.Р. Юсупова, Н.Г. Нурғалиева, Д.М. Кузина, Л.Р. Косарева, Д.А. Юнусова // *Успехи современного естествознания*. – 2023. – № 7. – С. 72–81.
13. Гареев А.М. Сабакты. Башкирская энциклопедия. – Уфа: Башкир. Энцикл, 2015–2020. – Т. 5. – 358 с.
14. Борисов А.С. Система технологического обеспечения палеомагнитных исследований отложений современных озер: автореф. дис. ... д-ра геол.-минерал. наук. – Казань, 2004. – 46 с.
15. Kuzina D.M., Iusupova A.R., Antonenko V.V. Magnetic studies of Lake Sabakty sediments (South Ural, Russia) // *20th SGEM International Multidisciplinary Scientific GeoConference Proceedings*. – Sofiya, 2020. – Vol. 19. – № 4.2. – P. 201–208.
16. Карогодин Ю.Н. Седиментационная цикличность. – М.: Недра, 1980. – 242 с.
17. Шванов В.Н. Песчаные породы и методы их изучения: (распространение, структуры, текстуры). – Л.: Недра, 1969. – 248 с.
18. Леусова Н.Ю. Устойчивость и сохранность биогенных форм кремнезема в углях // *Успехи современного естествознания*. – 2020. – № 12. – С. 117–123.
19. Солотчин П.А. Литолого-минералогические летописи донных отложений озер Сибирского региона как основа палеоклиматических реконструкций: дис. ... д-ра геол.-минерал. наук. – Новосибирск, 2023. – 237 с.
20. Аутигенные карбонаты голоценовых осадков озера Иткуль (юг Западной Сибири) – индикаторы изменений климата / Э.П. Солотчина, М.И. Кузьмин, П.А. Солотчин, А.Е. Мальцев, Г.А. Леонова, И.В. Даниленко // *Докл. АН*. – 2019. – Т. 487. – № 1. – С. 54–59.

21. Allen H.D. Response of past and present Mediterranean ecosystems to environmental change // *Progress in Physical Geography Earth and Environment*. – 2003. – Vol. 27. – № 3. – P. 359–377.
22. A pervasive millennial-scale cycle in North Atlantic Holocene and glacial climates / G. Bond, S.W. Shower, M. Cheseby, R. Lotti, P. Almasi, P. Demenocal, P. Priore, H. Cullen, I. Hajdas, G. Bonani // *Science*. – 1997. – Vol. 278. – № 5341. – P. 1257–1266.
23. Первые результаты изотопной геохимии донных отложений озера Сабакты (Южный Урал) / А.Р. Юсупова, Н.Г. Нургалиева, Г.А. Баталин, Б.И. Гареев // *Современные проблемы геохимии-2021: Материалы конференции молодых ученых*. – Иркутск, 14–17 сентября 2021. – С. 36–38.
24. Экология озера Большое Миассово / под ред. А.Г. Рогозина, В.А. Ткачева. – Миасс: Ильмен. гос. Заповедник, 2000. – 318 с.
25. Bacterial sulfate reduction and salinity two controls on dolomite precipitation in Lagoa Vermelha and Brejo do Espinho (Brazil) / Y. van Lith, C. Vasconcelos, R. Warthmann, J.C.F. Martins, J.A. McKenzie // *Hydrobiologia*. – 2002. – Vol. 485. – P. 35–49.
26. Vasconcelos C., McKenzie J.A. Microbial mediation of modern dolomite precipitation and diagenesis under anoxic conditions (Lagoa Vermelha, Rio de Janeiro, Brazil) // *J. Sediment. Res.* – 1997. – Vol. 67. – P. 378–390.
27. Wright D.T. The role of sulphate-reducing bacteria and cyanobacteria in dolomite formation in distal ephemeral lakes of the Coorong region, South Australia. *Sediment // Geol.* – 1999. – Vol. 126. – № 1–4. – P. 147–157.
28. Microbial dolomite precipitation using sulfate reducing and halophilic bacteria: results from Qinghai Lake, Tibetan Plateau, N.W. China / S. Deng, H. Dong, G. Lv, H. Jiang, B. Yu, M.E. Bishop // *Chem. Geol.* – 2010. – Vol. 278. – № 3. – P. 151–159.
29. Microbial precipitation of dolomite in methanogenic groundwater / J.A. Roberts, Ph.C. Bennett, L.A. González, G.L. Macpherson, L.K. Milliken // *Geology*. – 2004. – Vol. 34. – № 4. – P. 277–280.
30. Precipitation of low-temperature dolomite from an anaerobic microbial consortium: the role of methanogenic Archaea / P.A. Kenward, R.H. Goldstein, L.A. González, J.A. Roberts // *Geobiology*. – 2009. – Vol. 7. – № 5. – P. 556–565.
31. Origin of modern dolomite in surface lake sediments on the central and western Tibetan Plateau / J. Li, L. Zhu, M. Li, J. Wang, Q. Ma // *Quaternary International*. – 2020. – Vol. 544. – P. 65–75.
32. Новоселов А.А., Малых А.Г. Особенности минерального состава донного сапропелевого осадка озера Грязное (юг Тюменской области) // *Успехи современного естествознания*. – 2018. – № 12. – Ч. 1. – С. 194–199.
33. Хотинский Н.А. Голоцен Северной Евразии: опыт трансконтинентальной корреляции этапов развития растительности и климата. – М.: Наука, 1977. – 199 с.
34. Maslennikova A.V., Udachin V.N., Aminov P.G. Lateglacial and holocene environmental changes in the Southern Urals reflected in palynological. Geochemical and diatom records from the lake Syrytkul sediments // *Quaternary International*. – 2016. – Vol. 420. – № 28. – P. 65–75.
35. Эволюция почв и изменение климата восточно-европейской полупустыни в позднем голоцене / В.А. Демкин, М.И. Дергачева, А.В. Борисов, С.Н. Удалцов // *Почвоведение*. – 1998. – № 2. – С. 148–157.

Информация об авторах

Анастасия Рафаиловна Юсупова, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, Институт геологии и нефтегазовых технологий, Казанский федеральный университет, Россия, 420008, г. Казань, ул. Кремлевская, 4/5. i@ajusupova.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8732-3053>

Нурия Гавазовна Нургалиева, доктор геолого-минералогических наук, доцент, профессор кафедры геологии нефти и газа имени академика А.А. Трофимука, Институт геологии и нефтегазовых технологий, Казанский федеральный университет, Россия, 420008, г. Казань, ул. Кремлевская, 4/5. nurgal07@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-4372-9777>

Алексей Михайлович Рогов, младший научный сотрудник, Институт геологии и нефтегазовых технологий, Казанский федеральный университет, Россия, 420008, г. Казань, ул. Кремлевская, 4/5. Aleksej.Rogov@kpfu.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1626-4636>

Поступила в редакцию: 27.09.2023

Поступила после рецензирования: 10.10.2023

Принята к публикации: 24.05.2024

REFERENCES

1. Smoot J.P., Lowenstein T.K. Depositional environments of non-marine evaporates. *Evaporites, Petroleum and Mineral Resources*. Ed. by J.L. Melvin. New York, Elsevier, 1991. pp. 189–348.
2. Maslennikova A.V., Udachin V.N., Pirogov D.V., Khvorov P.V. Reconstruction of the conditions of lake sedimentogenesis in the Late Glacial and Holocene of the Middle Urals. *Lithosphere*, 2016, no. 6, pp. 166–176. (In Russ.)
3. Logvinenko N.V. *Petrography of sedimentary rocks with the basics of research methodology*. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1984. 416 p. (In Russ.)
4. Cheng A., Yu J., Gao Ch., Zhang L. Mineralogical and mineral composition analysis of lacustrine sediments from Lake Toson, NE Qinghai-Tibet Plateau, China. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, vol. 783, pp. 1–5.
5. Krivonogov S., Maltsev A., Zelenina D., Safonov A. Microbial diversity and authigenic mineral formation of modern bottom sediments in the littoral zone of Lake Issyk-Kul, Kyrgyz Republic (Central Asia). *Biology*, 2023, vol. 12, no. 5, pp. 1–19.
6. Deryagin V.S., Maslennikova A.S., Kolodich O.P. Landscape water intake of Lake Ufa (Eugene Ural) at intermediate sites of the Holocene. *Landscape and landscape ecology: landscape coadaptation and existing duty. Materials of International science-practical conference*. Simferopol, 2020. pp. 246–251. (In Russ.)

7. Panova N.K. *History of forest and swamp vegetation of the central mountain province of the Southern Urals in the Holocene: according to the data of spore-pollen analysis of peat*. Cand. Dis. Sverdlovsk, 1986. 183 p. (In Russ.)
8. Maslennikova A.V., Udachin V.N., Deryagin V.V. *Paleoecology and geochemistry of lake sedimentation of the Holocene of the Urals*. Yekaterinburg, RIO UrO RAS Publ., 2014. 136 p. (In Russ.)
9. Krylov P.S., Nurgaliev D.K., Kuzina D.M., Yasonov P.G. High-resolution seismic studies of shallow Lake Sabakty (Russia). *19th SGEM International Multidisciplinary Scientific GeoConference EXPO Proceedings*. Sofiya, 2019. vol. 19, no. 4.2, pp. 229–234.
10. Shevchenko A.M., Ostrovsky V. Ecological and faunistic characteristics of the macroinvertebrate community of Sabakty lake (Southern Trans-Urals, Republic of Bashkortostan). *Materials on flora and fauna of the Republic of Bashkortostan*, 2018, no. 19, pp. 147–158. (In Russ.)
11. Maslennikova A.V., Artemyev D.A., Zazovskaya E.P., Deryagin V.V., Gulakov V.O., Udachin N.V., Aminov P.G., Udachin V.N. Geochemical chronicle of Lake Sabakty: quantitative assessment of water conductivity and reconstruction of sedimentation conditions of the Late Glacial and Holocene steppe zone of the Southern Urals. *Lithosphere*, 2023, vol. 23, no. 3, pp. 410–429. (In Russ.)
12. Yusupova A.R., Nurgaliev N.G., Kuzina D.M., Kosareva L.R., Yunusova D.A. Features of the material composition of the bottom sediments of Lake Sabakty (Southern Urals). *Advances in current natural sciences*, 2023, no. 7, pp. 72–81. (In Russ.)
13. Gareev A.M. *Sabakty*. *Bashkir Encyclopedia*. Ufa, Bask. Encyclopedia Publ., 2015–2020. Vol. 5, 358 p. (In Russ.)
14. Borisov A.S. *System of technological support for paleomagnetic studies of sediments of modern lakes*. Dr. Diss. Abstract. Kazan, 2004. 46 p. (In Russ.)
15. Kuzina D.M., Iusupova A.R., Antonenko V.V. Magnetic studies of Lake Sabakty sediments (South Ural, Russia). *20th SGEM International Multidisciplinary Scientific GeoConference Proceedings*. Sofiya, 2020. Vol. 19, no. 4.2, pp. 201–208.
16. Karogodin Yu.N. *Sedimentation cyclicity*. Moscow, Nedra Publ., 1980. 242 p. (In Russ.)
17. Shvanov V.N. *Sand rocks and methods of their study: (distribution, structures, textures)*. Leningrad, Nedra Publ., 1969. 248 p. (In Russ.)
18. Leusova N.Y. Stability and preservation of biogenic forms of silica in coals. *Advances in current natural sciences*, 2020, no. 12, pp. 117–123. (In Russ.)
19. Solotchin P.A. *Lithological and mineralogical chronicles of bottom sediments of lakes of the Siberian region as the basis of paleoclimatic reconstructions*. Dr. Diss. Novosibirsk, 2023. 237 p. (In Russ.)
20. Solotchina E.P., Kuzmin M.I., Solotchin P.A., Maltsev A.E., Leonova G.A., Danilenko I.V. Autigenic carbonates of Holocene sediments of Lake Itkul (south of Western Siberia) – indicators of climate change. *Dokl. AN*, 2019, vol. 487, no. 1, pp. 54–59. (In Russ.)
21. Allen H.D. Response of past and present Mediterranean ecosystems to environmental change. *Progress in Physical Geography Earth and Environment*, 2003, vol. 27, no. 3, pp. 359–377.
22. Bond G., Shower S.W., Cheseby M., Lotti R., Almasi P., Demenocal P., Priore P., Cullen H., Hajdas I., Bonani G. A pervasive millennial-scale cycle in North Atlantic Holocene and glacial climates. *Science*, 1997, vol. 278, no. 5341, pp. 1257–1266.
23. Yusupova A.R., Nurgaliev N.G., Batalin G.A., Gareev B.I. The first results of isotope geochemistry of bottom sediments of Lake Sabakty (Southern Urals). *Modern problems of geochemistry-2021. Proceedings of the conference of young scientists*. Irkutsk, September 14–17, 2021. pp. 36–38. (In Russ.)
24. *Ecology of Lake Bolshoe Miassovo*. Eds. A.G. Rogozin, V.A. Tkachev. Miass, Ilmen State Nature Reserve, 2000. 318 p. (In Russ.)
25. Van Lith Y., Vasconcelos C., Warthmann R., Martins J.C.F., McKenzie J.A. Bacterial sulfate reduction and salinity two controls on dolomite precipitation in Lagoa Vermelha and Brejo do Espinho (Brazil). *Hydrobiologia*, 2002, vol. 485, pp. 35–49.
26. Vasconcelos C., McKenzie J.A. Microbial mediation of modern dolomite precipitation and diagenesis under anoxic conditions (Lagoa Vermelha, Rio de Janeiro, Brazil). *J. Sediment. Res.*, 1997, vol. 67, pp. 378–390.
27. Wright D.T. The role of sulphate-reducing bacteria and cyanobacteria in dolomite formation in distal ephemeral lakes of the Coorong region, South Australia. *Sediment. Geol.*, 1999, vol. 126, no. 1–4, pp. 147–157.
28. Deng S., Dong H., Lv G., Jiang H., Yu B., Bishop M.E. Microbial dolomite precipitation using sulfate reducing and halophilic bacteria: results from Qinghai Lake, Tibetan Plateau, NW China. *Chem. Geol.*, 2010, vol. 278, no. 3, pp. 151–159.
29. Roberts J.A., Bennett Ph.C., González L.A., Macpherson G.L., Milliken L.K. Microbial precipitation of dolomite in methanogenic groundwater. *Geology*, 2004, vol. 34, no. 4, pp. 277–280.
30. Kenward P.A., Goldstein R.H., González L.A., Roberts J.A. Precipitation of low-temperature dolomite from an anaerobic microbial consortium: the role of methanogenic Archaea. *Geobiology*, 2009, vol. 7, no. 5, pp. 556–565.
31. Li J., Zhu L., Li M., Wang J., Ma Q. Origin of modern dolomite in surface lake sediments on the central and western Tibetan Plateau. *Quaternary International*, 2020, vol. 544, pp. 65–75.
32. Novoselov A.A., Malykh A. G. Features of the mineral composition of this sapropel sediment of Lake Gryaznoe (south of the Tyumen region). *Advances in current natural sciences*, 2018, no. 12, P. 1, pp. 194–199. (In Russ.)
33. Khotinsky N.A. *Holocene of Northern Eurasia: experience in transcontinental correlation of stages of vegetation and climate development*. Moscow, Nauka Publ., 1977. 199 p. (In Russ.)
34. Maslennikova A.V., Udachin V.N., Aminov P.G. Lateglacial and Holocene environmental changes in the Southern Urals reflected in palynological. Geochemical and diatom records from the lake Syrytkul sediments. *Quaternary International*, 2016, vol. 420, no. 28, pp. 65–75.
35. Demkin V.A., Dergacheva M.I., Borisov A.V., Udaltsov S. N. Evolution of soils and climate change of the East European semi-desert in the Late Holocene. *Soil Science*, 1998, no. 2, pp. 148–157. (In Russ.)

Information about the authors

Anastasia R. Yusupova, Cand. Sc., Senior Researcher, Kazan Federal University, 4/5, Kremlyovskaya street, Kazan, 420008, Russian Federation. 3053 i@ajusupova.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8732-3053>

Nuriia G. Nurgalieva, Dr. Sc., Professor, Kazan Federal University, 4/5, Kremlyovskaya street, Kazan, 420008, Russian Federation. nurgal07@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-4372-9777>

Alexey M. Rogov, Junior Researcher, Kazan Federal University, 4/5, Kremlyovskaya street, Kazan, 420008, Russian Federation. Aleksej.Rogov@kpfu.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1626-4636>

Received: 27.09.2023

Revised: 10.10.2023

Accepted: 24.05.2024

УДК 622.24; 539.37; 536.24; 532.54
DOI: 10.18799/24131830/2024/8/4703
Шифр специальности ВАК: 01.02.05, 2.8.2

Анализ прихвата трубы при бурении скважин в южно-иракских коллекторах известняка и песчаника

С.С. Ал-обаиди, С.Н. Харламов✉

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск

✉ kharsn@mail.ru

Аннотация. Актуальность. Прихват бурильных труб увеличивает непроизводительное время буровой установки, повышает риски контроля специального оборудования при проходке сложных по структуре коллекторов. Для точного описания таких негативных сценариев требуется универсальная методика, включающая комплексную геомеханическую и гидродинамическую модель с детальным прогнозом взаимосвязанных физических процессов в открытой термодинамической системе «коллектор–скважина–буровой раствор». Проблемы построения «гибкой» модели, разработки корректной методики исследования прихватов нетривиальны и представляют интерес для инженерных приложений в нефтегазовой отрасли. **Цель.** По реальным данным на месторождениях в Южном Ираке предлагается: исследовать прихваты труб при бурении скважин с наклонной образующей ствола; оценить риски, выявить особенности и закономерности прихватов; разработать модель и методику их предупреждения. **Объект:** прихваты и их эффекты. **Методы:** геомеханический и гидродинамический, численный и аналитический. **Результаты.** Представлен детальный обзор и критический анализ сценариев прихвата бурильных труб на месторождениях в Южном Ираке. Проанализированы факторы, влияющие на прихват и эффективность работы буровой установки в процессе бурения наклонных и горизонтальных участков скважин. Установлены критерии, определяющие эффективность бурения с учетом изменений режимов работы оборудования. Обсуждаются особенности управления параметрами бурения, ответственными за предупреждение прихвата на ранней стадии, седиментации шлама в донной части наклонных участков и засорения скважины. Выводы проиллюстрированы результатами анализа фактических сценариев прихватов, данными численного моделирования динамики частиц в затрубном пространстве горизонтальных эксцентричных скважин, полученными в расчетах сложного сдвигового течения неньютоновской дисперсной смеси с использованием идей эйлерово-эйлерова и эйлерово-лагранжева подходов.

Ключевые слова: бурение, прихват, корка, моделирование, давление, седиментация, гидротранспорт, очистка, методика, управление

Для цитирования: Ал-обаиди С.С., Харламов С.Н. Анализ прихвата трубы при бурении скважин в южно-иракских коллекторах известняка и песчаника // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 8. – С. 91–111. DOI: 10.18799/24131830/2024/8/4703

UDC 622.24; 539.37; 536.24; 532.54
DOI: 10.18799/24131830/2024/8/4703

Analysis of pipe sticking at well drilling in the South Iraqi limestone and sandstone reservoirs

S.S. Al-obaidi, S.N. Kharlamov✉

National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

✉ kharsn@mail.ru

Abstract. Relevance. Sticking of drill pipes increases the drilling rig unproductive time and risks of monitoring special equipment when drilling complex reservoirs. To accurately describe such negative scenarios, a universal methodology is required. It includes a comprehensive geomechanical and hydrodynamic model with a detailed forecast of interconnected

physical processes in an open thermodynamic system "reservoir–well–drilling mud". The problems of "variable" model evaluation, developing a correct method for studying pipe sticking points are not trivial and are of interest for engineering applications at the oil and gas industry. **Aim.** Based on actual data from fields in the Southern Iraq, it is proposed to: investigate pipe sticking when drilling wells with an inclined wellbore: assess risks, identify features and patterns of pipe sticking; develop a model and a methodology for their prevention. **Object.** Pipe sticking and its effects. **Method.** Geomechanical and hydrodynamic, numerical and analytical. **Results.** The paper introduces the detailed overview and critical analysis of scenarios of pipe sticking in the Southern Iraq fields. The authors have analyzed the factors affecting pipe sticking and efficiency of the drilling rig in drilling inclined horizontal sections of wells. They established the criteria determining the effectiveness of drilling taking into account changes in drilling modes. The paper discusses the specifics of managing the drilling parameters responsible for preventing pipe sticking at an early stage, sedimentation of cuttings in the bottom of inclined sections and plugging of the well. The conclusions are illustrated by the results of analysis of actual pipe sticking scenarios, numerical modeling of particle dynamics in the annulus of horizontal eccentric wells obtained at the investigation of the complex shear flow of the non-Newtonian dispersed mixture using the ideas of the Euler–Euler and Euler–Lanrange approaches.

Keywords: drilling, pipe sticking, crust, modeling, pressure, sedimentation, hydraulic transport, cleaning, technique, control

For citation: Al-obaidi S.S., Kharlamov S.N. Analysis of pipe sticking at well drilling in the South Iraqi limestone and sandstone reservoirs. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 8, pp. 91–111. DOI: 10.18799/24131830/2024/8/4703

Введение

Хорошо известно [1–6], что обеспечение безопасного и экономически выгодного процесса бурения нефтяных и газовых скважин возможно при устойчивом функционировании элементов специального оборудования и его многочисленных режимных параметров. В таких условиях следует учитывать, что скважина должна быть достаточно большой для свободного прохождения обсадной трубы с минимальной вероятностью закупорки [2], тогда проблемы, возникающие в процессе бурения, будут связаны в основном с обстоятельствами прихвата труб, а не с операцией контроля скважины [6]. Анализ [4–6] показывает, что в буровой промышленности большинства развитых стран случаи прихвата труб по-прежнему являются основной причиной Непроизводительного Времени (НВТ), несмотря на то, что их в значительной степени можно предотвратить путем эффективного планирования и соблюдения соответствующих правил. Основу этих правил составляют методики эффективного использования: алгоритмов технологических операций по очистке скважин; добавок, смазок, антиприлипателей, оптимизирующих процессы переноса в смеси; деформационных эффектов в коллере и реофизических, молярных и диффузионных изменений свойств буровых растворов по снижению сопротивления трения между бурильной колонной и пластом [1]. В таких условиях для предотвращения инцидентов с застрявшими трубами, определения критических режимов бурения от инженера-нефтяника требуются глубокие знания о деталях развития термодинамических процессов в скважине [2]. Эти сведения полезны в фундаментальном и практическом отношении, т. к. дают представления не только о затратах на эксплуатацию скважины. Они способны корректно предсказывать события, связанные с контролем процесса циркуляции раствора, наруше-

ниями буровых операций при произвольном изменении угла наклона и горизонтальной ориентации ее ствола [7, 8]. Учитывая сказанное, в статье поставлены *цели*: исследовать особенности и закономерности прихватов, возникающих в ходе эксплуатационного бурения на Южном месторождении в Ираке; уяснить роль отдельных эффектов в физических процессах переноса массы, импульса, вязкоупругого напряжения и пространственных деформаций смеси вокруг ствола; разработать методики оперативного предупреждения прихвата в режиме реального времени.

Анализ эффектов, сопровождающих прихват бурильных труб, и проблемы их моделирования

Анализ прихвата труб целесообразно начать со сценариев, отвечающих вертикальной ориентации ствола скважин. Тогда полученные сведения будут полезны при выработке заключений на обобщение данных об осложняющих эффектах, вызванных произвольностью угла наклона при бурении скважин на нефтегазовых месторождениях в Южном Ираке. Данная методология определяется еще и тем, что месторождения в Южном Ираке состоят из оползающих глинистых пород и высокопроницаемых пластов, для бурения которых необходимо использовать относительно густые буровые растворы, а это обостряет условия прихвата. Более того, согласно [9–11], для выработки алгоритма по поддержанию безаварийного бурения следует учитывать, что коричневые месторождения в этом районе содержат пласты, находящиеся в истощенном состоянии. Причем на некоторых месторождениях давление истощения почти на 35 % меньше, чем эталонное пластовое давление. Проведенный библиографический анализ показывает [5–11], что в большинстве инженерных методик по прогнозу

изменений дифференциального давления и эффективности очистки ствола содержится полуэмпирическая информация, которая нуждается в коррекции. В частности, при обобщении результатов на более широкий диапазон изменений характерных параметров следует учитывать и новые нетривиальные эффекты, которые сопровождают и осложняют бурение. Например, в обводненных зонах, где давление в скважине превышает давление в пласте, бурильная колонна может застрять в скважине и оказаться в ее фильтрационной корке. Последнее может привести к тому, что для извлечения трубы потребуются очень большие усилия. Так, данные, представленные на рис. 1, иллюстрируют роль параметров, определяющих механизм дифференциального прихвата [12] в указанных обстоятельствах. В результате, согласно схеме на рис. 1, в [13] определена прогнозируемая ширина зоны контакта W , дюйм, по связи (1):

$$W = 2r \left(\alpha \cos \frac{(2r - 2h_m)^2 - (2r_{dc})^2 - (2r - 2r_{dc})^2}{2(2r - 2r_{dc})2h_m} \right). \quad (1)$$

Здесь r – локальный радиус буровой трубы, дюйм; h_m – толщина фильтрационной корки, дюйм; r_{dc} – радиус рабочей бурильной колонны, дюйм; 2α – угол расположения трубы.

Тогда значение дифференциального давления P_d , фунт/дюйм², предлагается получить в виде (2):

$$P_d = \frac{N}{C \cdot L \cdot W}, \quad (2)$$

где N – напряжение трубы, кгс; C – коэффициент трения трубы; L – длина контакта трубы с коркой, фут; W – ширина зоны контакта, дюйм.

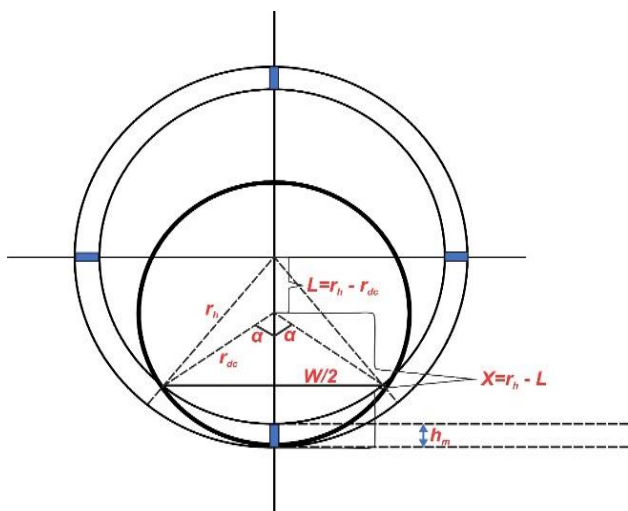


Рис. 1. Схема дифференциального прихвата и параметры для прогноза заклинивания трубы
Fig. 1. Scheme of differential pipe sticking and parameters for predicting pipe sticking

При построении детального численного решения рассматриваемой задачи стоит учитывать [14], что ее гидродинамический блок даст представление об эволюции конвективно-диффузионных мелко-масштабных процессов на границах распределения фаз в гетерогенной системе, осложненных переходами вихревой природы и нелинейностью изменений морфологических свойств смеси. Прогноз этих процессов потребует корректного задания ряда эмпирических параметров, определяющих пространственное изменение динамической и диффузионной, осредненной и пульсационной структуры смеси в поле действия внешних сил [15]. Так как эти сведения зачастую отсутствуют в практических исследованиях процесса бурения скважины, возникают трудности численного прогноза очистки ствола. Неспособность очистить ствол скважины при использовании обычных буровых растворов может вести к интенсивному накоплению шлама в кольцевом пространстве скважины и в конечном счете вызовет прихват трубы. Учитывая сложность реализации численных моделей прихвата, исследователи обратились к феноменологическому подходу [16, 17] и представили модель оценки минимальных скоростей потока жидкости и газа [18], в рамках которой можно получить приемлемую концентрацию шлама в стволе скважины, а также значения предпочтительного падения давления, трения при очистке эксцентричных пространств скважин при использовании буровых растворов со специфическими реофизическими свойствами [19]. Из данных [20] следует, что на прихват трубы активно влияют условия, определяющие конфигурацию задачи гидродинамики и сопряженного тепломассопереноса в открытой термодинамической системе «внешняя среда/коллектор – границы трубы/стенки канала – рабочее тело/смесь». Хорошо известно, что для валидации численного метода и модели процесса, верификации результатов расчета особую ценность приобретают данные полуэмпирических моделей. Поэтому при анализе прихвата апостериорные корреляции для скорости в кольцевом пространстве являются одними из наиболее важных зависимостей, способных дать представление о качестве очистки ствола в вертикальных скважинах. В них скорость бурового раствора, транспортирующая шлам, должна превышать скорость его соскальзывания на дно ствола скважины под действием силы тяжести. Одно из эмпирических правил по поиску корректного значения скорости в кольцевом пространстве для вертикальных скважин заключается в следующем: скорость в кольцевом пространстве должна быть как минимум в два раза больше скорости скольжения шлама [20]. Такую скорость скольжения V_s , фут/с, смеси бурового раствора с частицами выработки при лами-

нарном течении в режиме естественной седиментации твердых частиц, согласно [21], целесообразно определять в виде (3):

$$V_s = \frac{2gd_c \cdot 2(\rho_s - \rho_m)}{92.6\mu}. \quad (3)$$

Здесь g – ускорение силы тяжести, фут/с²; d_c – наибольший диаметр частиц шлама, фут; ρ_m , ρ_s – плотности бурового раствора и твердых частиц шлама, соответственно, фунт/фут³; μ – динамическая вязкость бурового раствора, сПз. Как известно (например, [21]), метод оценки минимальной затрубной скорости для обеспечения соответствующей очистки ствола скважины основан на подходе Фуллертон. Этот метод предполагает, что размер шлама составляет 0,25 дюйма, плотность шлама – 2,5 сегмента, а затрубная скорость жидкости должна быть в два раза больше скорости седиментации частиц шлама. Подход основан на выполнении следующего условия для плотности бурового раствора, ρ_{df} . Так, согласно [13], при $\rho_{df} \leq 1,43$ г/см³ минимальная кольцевая скорость $V_{\min}$, фут/мин, может быть рассчитана в виде (4):

$$V_{\min} = \frac{613}{d_h \rho_{df}}, \quad (4)$$

где d_h – диаметр ствола скважины, [дюйм]. Заметим, что при $\rho_{df} \leq 1,43$ г/см³ изменения расхода жидкости от диаметра ствола скважины иллюстрируют данные, представленные на рис. 2. Вместе с этим анализ имеющихся публикаций по рассматриваемой проблеме указывает, что большинство проблем с прихватом труб на южных месторождениях Ирака возникло из-за мергеля и оползающих сланцев, а также из-за чрезмерной плотности бурового раствора в скважине [6]. Для выявления особенностей этих процессов важны представления о диаграмме изменения градиента разрыва порового давления на территориях южных нефтяных месторождений Ирака в зависимости от различных значений глубины и плотности раствора, которые приведены на рис. 3. Так, на рис. 3 обозначено: Кпл – коэффициент поглощения, МПа/м; Кл – коэффициент аномальности пластового давления, МПа/м; ρ_0 – относительная плотность промывочной жидкости, кг/м³. Отметим, что точные распределения градиента разрыва очень важны для планирования скважин и мероприятий в случае инцидентов с прихватом труб. Параметры бурения, полученные с помощью приборов каротажа бурового раствора, представляются полезными при анализе случаев прихвата трубы не только после того, как труба оказалась заклиненной, но и при возникновении первых признаков прихвата. В силу сказанного, в настоящей работе приводятся параметры, полученные с помощью каротажных установок бурового раствора.

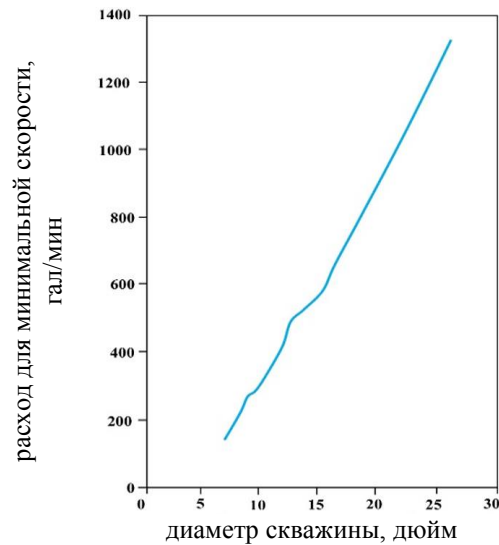


Рис. 2. Зависимость расхода раствора от диаметра ствола скважины при минимальной кольцевой скорости при $\rho_{df} \leq 1,43$ г/см³

Fig 2. Dependence of solution flow rate on borehole diameter at minimum annular velocity at $\rho_{df} \leq 1,43$ г/см³

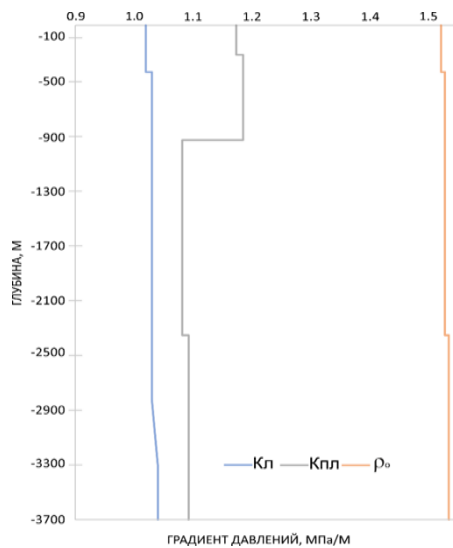


Рис. 3. Градиент давлений на юге Ирака в зависимости от различных значений глубины и плотности раствора при параметрах $Kл=1,02-1,09$ МПа/м; $Kпл=1,1-1,8$ МПа/м; $\rho_0=1,5-1,52$ кг/м³

Fig 3. Gradient of pore pressure rupture in southern Iraq as a function of different values of depth and solution density at parameters $Kл=1.02-1.09$ МПа/м; $Kпл=1.1-1.8$ МПа/м; $\rho_0 = 1.5-1.52$ kg/m³

Данные с конкретного оборудования передаются после измерения с помощью сложных измерительных преобразователей [6, 10, 20]. Результаты, полученные в рамках данной методологии, подтверждают, что нефтяные месторождения в Южном Ираке действительно состоят из глинистых и пластичных мергелевых пластов с высокой прони-

цаемостью, что может привести к инцидентам с прихватом труб. Кроме того, истощенные пласты-коллекторы могут привести к потерям циркуляции [22–25], а известняковые пласты с естественными трещинами будут вести к полной потере труб во время бурения. В целом анализ результатов, представленных в [1–12, 22–25], позволяет отметить, что при уяснении эффектов, сопровождающих прихват труб в скважинах, расположенных на юге Ирака, можно выработать практические рекомендации персоналу для прогноза режимов прихвата и построения алгоритма технологических операций по освобождению застрявших труб. Эти регламентирующие действия опираются на знание особенностей, закономерностей развития деформационных пространственных процессов в среде и оборудовании в силу их реакций на изменение спектра внутренних и внешних сил, структуры и режимов транспорта бурового раствора в рабочей термодинамической системе «внешняя среда–труба–раствор» в рамках геомеханической модели Земли (3-Dimensional Mechanical Earth Model (3D-MEM)). Стоит отметить, что при исследовании прихватов в рамках 3D-MEM моделей учитывается, что они классифицированы в виде групп (согласно данным [26–28]), изображенных на рис. 4.



Рис. 4. Статистика прихватов при бурении скважин
Fig. 4. Pipe sticking statistics when drilling

Библиографический анализ показывает, что для проявления прихвата трубы характерны условия: невозможности извлечения бурового оборудования (бурильных труб, колонны, обсадных или насосно-компрессорных труб) из ствола скважины даже при ее большом диаметре, вмещающем обсадную колонну; проектирования бурильных колонн с запасом перегрузки от $5 \cdot 10^4$ до 10^5 фунтов, обеспечивающей дополнительное усилие, необходимое в случае прихвата трубы; наличия прочной и крупной (в размерах) фильтрационной корки, сопровождающей дифференциальный прихват. Кроме того, существует еще две группы, характеризую-

щие случаи прихвата труб, важные для 3D-MEM моделирования: 1) прихваты, вызванные твердыми частицами; 2) прихваты, связанные с изменением образующей ствола скважины. В частности, в [27, 28] отмечено, что использование системы верхнего привода дает возможность осуществлять развешивание (прямое и обратное в полной стойке) в условиях захода или выхода из буровой области, что сводит к минимуму возможные случаи заклинивания трубы. В [29, 30] указано, что системы управления данными бурения в реальном времени могут уменьшить количество случаев прихвата трубы путем непрерывного контроля всех важных трендов изменения данных бурения через компьютер бурового блока. В [31] отмечается важность учета при моделировании физического процесса заклинивания эффектов от: изменений крутящего момента и сопротивления в скважине; поведения параметров процесса бурения при невращающейся колонне и без включенных насосов; характера изменений тензора напряжений при вертикальном и горизонтальном расположении ствола скважины. Интересны для включения в 3D-MEM-модель сведения об эффектах, сопровождающих дифференциальный прихват труб в наклонных скважинах. Они представлены в [32, 33], где обосновывается формулировка связей для оценки глубины точки прихвата в наклонном стволе скважины на основе данных по вытягиванию и вращению. Кроме того, в [34] подчеркивается, что при учете внешних сил, определяющих прихват, перепад давления является доминирующим фактором, который необходимо уменьшить. Тогда, следуя [35], этого можно достигнуть, организовав процесс вытеснения из скважины бурового шлама более легкой жидкостью. В отдельных исследованиях (например, [16]) отмечается, что если на северном месторождении Катара во время бурения концентрация буровой выработки была достаточно высокой, то это сопровождалось обрывом пачек и заклиниванием труб. Эти обстоятельства важны для анализа эффектов и риска механического прихвата буровой колонны вследствие седиментации шлама и осложнений, связанных с управлением и контролем скважины. Таким образом, представленный краткий библиографический анализ указывает [10–16, 23–36], что процессы, способствующие прихвату, имеют особенности, характерные для региона Южного Ирака. В силу этого представляется целесообразным более подробно остановиться на особенностях, отличающих прихваты труб при разработке нефтяных месторождений Южного Ирака, с указанием компоновки низа буровой трубы (КНБТ), параметров бурения в пластах Даммам и Харта, Тайарат и Радхума, а также проблем неустойчивости ствола скважины в пласте Бурган.

Инциденты с прихватом трубы

Скважина А. Первый случай прихвата трубы произошел в скважине А во время бурения на участке скважины 12 ¼ дюйма на глубине 2235 м со следующими параметрами: расход раствора потока $Q=3200$ л/мин; стоячее давление в трубе $SPP=3104$ psi; протность раствора $MW=1,15$ г/см³. На этой глубине наблюдались частичные потери и расход Q снижался поэтапно (с 3300 до 2500 л/мин). При этом было потеряно 285 баррелей бурового раствора. Бурение продолжалось с $Q=2000$ л/мин до нижней части интервала Мишриф на глубине 2214...2378 м, затем расход Q был увеличен до 2400 л/мин и бурение возобновилось до глубины 2453 м при $SPP=2000$ psi и потерях от 30 до 50 баррелей в час. В таком процессе была обнаружена (например, [37]) таблетка [Lost Circulation Material, (LCM)] объемом 130 баррелей и предприняты попытки откачки, но SPP увеличилось до 2500 psi. Данные анализа процесса показывают, что колонна застряла на отметке 2265 м. На рис. 5, а–е показаны характерные распределения параметров бурения и эскиз КНБТ на момент события с застрявшей трубой на отметке 2453 м. На глубине 2235 м, где произошли потери, расход Q уменьшился и пласт Мишриф находился в истощенном состоянии, поэтому ожидалась циркуляция раствора с потерями. Значение расхода Q в момент бурения, предшествовавшего случаю прихвата трубы, было приблизительно равно минимальной затрубной скорости. Кроме того, отметим, что 19-часовой процесс бурения в интервале глубины 2324...2453 м продолжался с частичными потерями – порядка 20...90 баррелей в час. Несмотря на закачку таблеток высокой вязкости (LCM) через регулярные интервалы, накопление шлама в кольцевом пространстве не удалось предотвратить. В рамках подхода Фуллертона был рассчитан минимальный дебит, равный приблизительно 1940 л/мин, при следующих значениях: диаметр скважины составлял 12 ¼ дюйма, диаметр выбуренной породы $d_{\text{шлама}}=0,25$ дюйма и плотность бурового раствора $MW=1,15$ г/см³, расход Q через насос имел значение порядка 2000 л/мин. Отметим, что если бы фактический диаметр скважины не был цилиндрическим и составлял примерно 13,5 дюйма, минимальный расход составил бы примерно 2200 л/мин. Кроме того, бурение продолжалось через пласты, содержащие известняк, перекрытый сланцевыми слоями. Из данных анализа (рис. 5) следует, что прихват трубы в скважине А ожидался из-за недостаточного дебита при относительно высокой скорости проходки, что привело к накоплению избыточного количества шлама в кольцевом пространстве. Прихват трубы произошел, когда часть верхнего стабилизатора вошла в контакт со скоплением шлама в

пласте Мишриф, несмотря на то, что время подъема забоя составляло 70 мин, скважина циркулировала в течение двух подъемов при каждом извлечении колонны. В таком процессе колонна имела протяженность порядка 2294 м с перегрузкой 40 т, но попытки пройти дальше отметки 2268 м не увенчались успехом из-за потери циркуляции, вызванной скоплением шлама, наличия LCM внутри колонны. Анализ [38, 39] показывает, что прихват трубы был связан с осаждением твердых частиц из-за *недостаточной очистки скважины*. После всех попыток промывки, включая закачку кислоты, скважина была выведена на боковой ствол путем спуска на глубину 2168 м. Согласно анализу [40, 41], данного случая прихвата трубы можно было бы избежать, если бы больше внимания уделялось *корректной очистке ствола и достижению минимального дебита* затрубного пространства. Отмечается, что в данном процессе циркуляция перед извлечением трубы должна быть более продолжительной.

Скважина В (сценарий прихвата трубы в скважине на более глубоких участках после отбора керна с 3749 до 3777 м за 15 часов). Так, на рис. 6 показаны параметры бурения и схема КНБТ в момент отбора керна на отметке 3777 м. При промывке скважины после двухчасовой циркуляции был зафиксирован дифференциальный прихват колонны на отметке 3775 м. Циркуляция осуществлялась с расходом на выходе 880 л/мин. Однако подход Фуллертона показывает, что минимальный дебит должен был составлять 1020 л/мин, что свидетельствует о том, что очистка скважины не происходила с соответствующими процессу условиями (оперативностью и скоростью очистки). Плотность бурового раствора была снижена с 1,77 до 1,74 г/см³, чтобы уменьшить перепад давления в интервале прихвата. Попытки освободить колонну путем вытягивания (ослабления до 60 т) не обеспечили достаточного усилия для освобождения колонны. По имеющимся данным, произошедший инцидент с прихватом был вызван дифференциальным прихватом в проницаемой зоне, подвергшейся воздействию высокого дисбаланса сил. Последовательные попытки откачки жидкости также оказались безуспешными. В таких условиях колонну отпустили и продолжили работы, выполнив нарезку бокового ствола. Анализ параметров, определяющих инцидент прихвата скважины В показывает, что для трубы характерны значения максимальной перетяжки (только 100 т). Средства индикации свободной точки показали, что забойная компоновка застряла на длине около 100 м. А это свидетельствует о том, что усилие освобождения превышает значения для рабочей колонны.

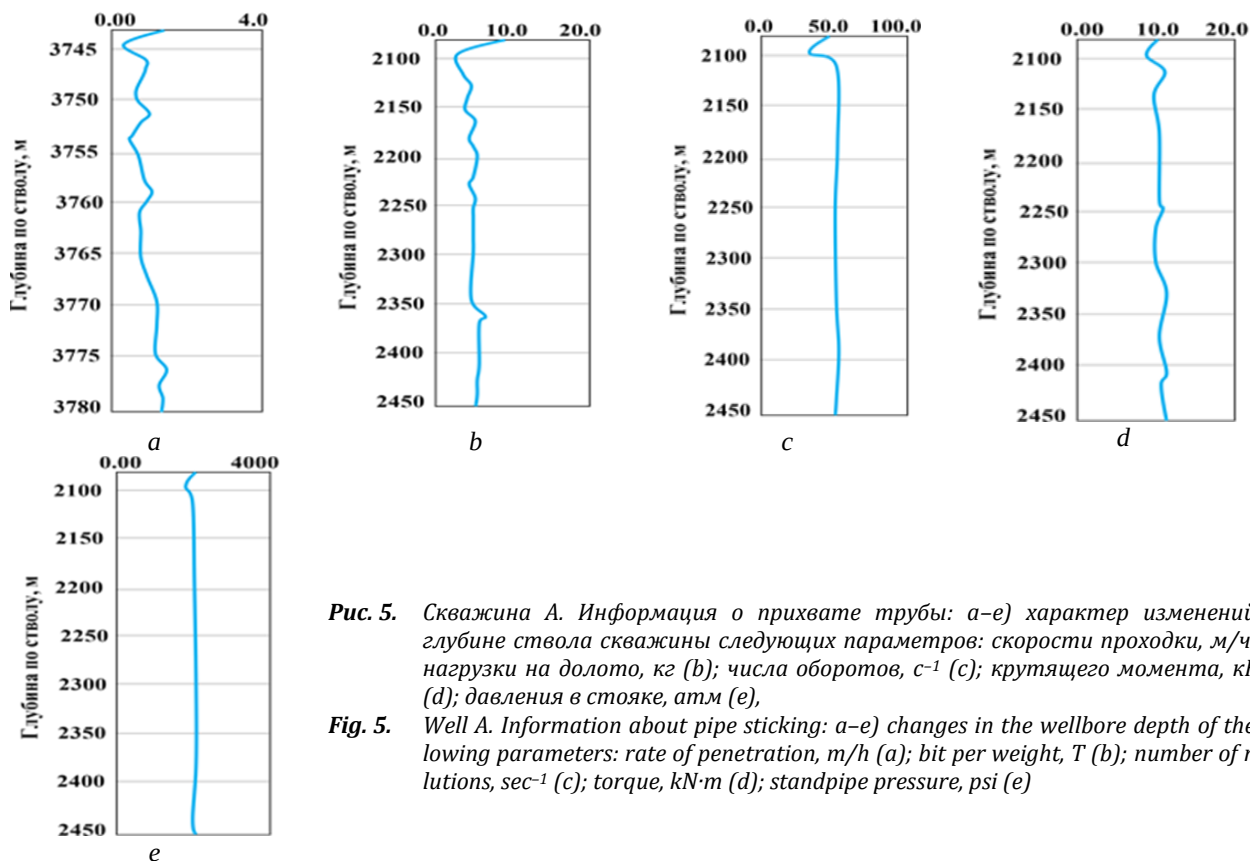


Рис. 5. Скважина А. Информация о прихвате трубы: а–е) характер изменений по глубине ствола скважины следующих параметров: скорости проходки, м/ч (а); нагрузки на долото, кг (б); числа оборотов, s^{-1} (с); крутящего момента, $kN \cdot m$ (д); давления в стояке, атм (е),

Fig. 5. Well A. Information about pipe sticking: a–e) changes in the wellbore depth of the following parameters: rate of penetration, m/h (a); bit per weight, T (b); number of revolutions, sec^{-1} (c); torque, $kN \cdot m$ (d); standpipe pressure, psi (e)

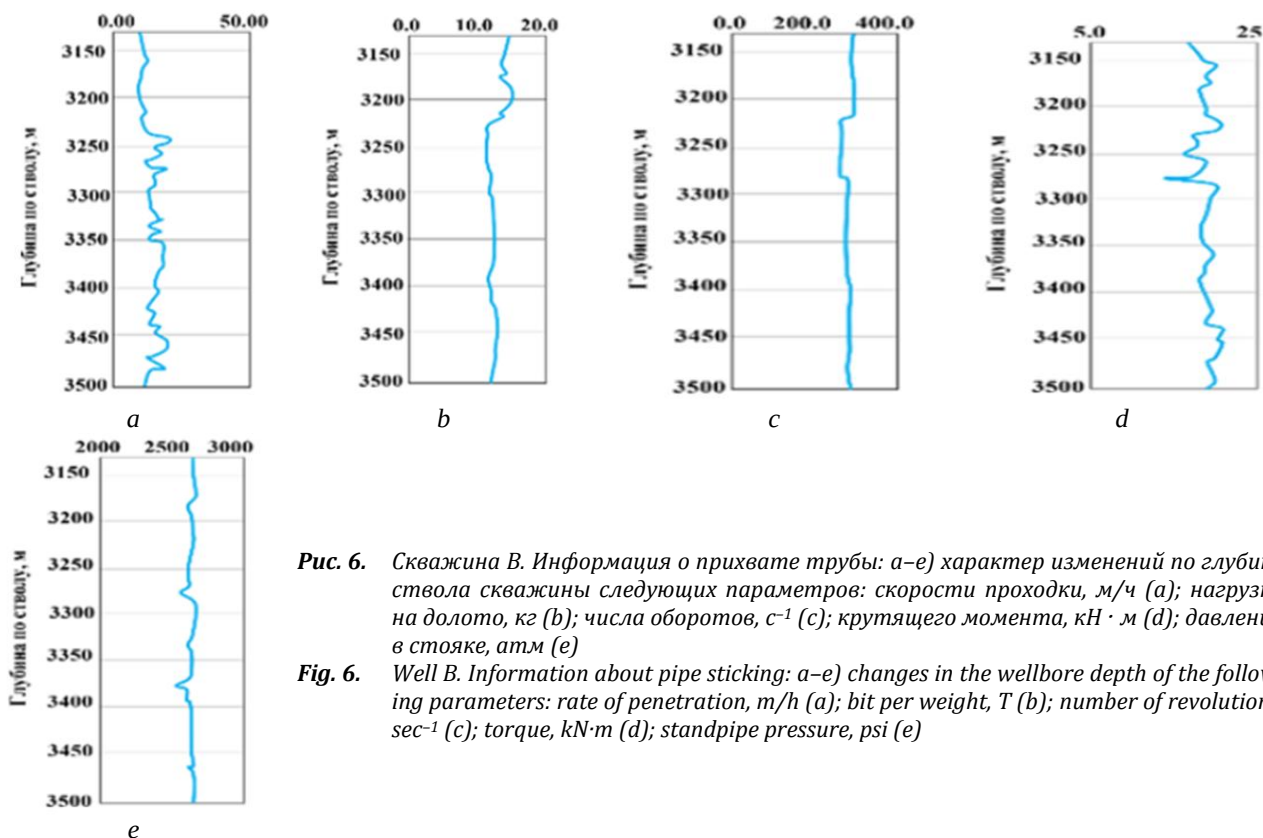


Рис. 6. Скважина В. Информация о прихвате трубы: а–е) характер изменений по глубине ствола скважины следующих параметров: скорости проходки, м/ч (а); нагрузки на долото, кг (б); числа оборотов, s^{-1} (с); крутящего момента, $kN \cdot m$ (д); давления в стояке, атм (е)

Fig. 6. Well B. Information about pipe sticking: a–e) changes in the wellbore depth of the following parameters: rate of penetration, m/h (a); bit per weight, T (b); number of revolutions, sec^{-1} (c); torque, $kN \cdot m$ (d); standpipe pressure, psi (e)

Также отметим, что вся представленная по данным рис. 5, 6 информация составляет важную часть в вопросах комплексного исследования проблем прихвата, опирающегося на методологию разработки современной геобурильной (3D-MEM) модели прихвата в рамках положений механики неоднородных сплошных сред и теории упругости. С этой точки зрения представляется целесообразным остановиться на достижениях, преимуществах и особенностях использования этого подхода к прогнозу эффектов, осложняющих бурение, и указать пути разработки универсальной модели и метода исследования проблем бурения.

Численное моделирование прихвата в рамках геомеханической модели

Перспективные подходы и их анализ. Выше установлено, что очевидной целью бурильщиков является выполнение технологических операций в режимах, отличающихся экономичностью, безопасностью, устойчивостью ствола скважины, при которых минимизируются комплексные эффекты от взаимосвязанного влияния пространственных деформационных, тепловых, гидродинамических и диффузионных процессов перераспределения массы в пластах-коллекторах, повышается движение бурильной колонны, интенсифицируется дробление породы и ее транспорт на поверхность буровым раствором. В таких условиях полная 3-D геомеханическая оценка напряженного состояния пластов с определением ориентации максимальных напряжений, распределений внешних и внутренних сил вокруг ствола и внутри скважины, самом буровом растворе способна точно установить причины непроизводительного времени из-за проблем с прихватом трубы, а также сформулировать план мероприятий операторам по обеспечению безаварийного режима бурения. Наш анализ показывает, что риск застревания трубы во время бурения особенно увеличивается при бурении с минимальным давлением в истощенных пластах-коллекторах. А прихват трубы и потеря циркуляции являются двумя основными факторами, приводящими к непроизводительному времени. Видно, что уяснение этих проблем ставит задачу для детального анализа всей картины взаимодействий сил и процессов переноса массы, импульса и энергии в термодинамической системе «порода–скважина–раствор» в рамках геобурильной MEM-модели. Разработка такой комплексной физико-математической MEM-модели и получение ее численного решения позволит иметь оптимальный сценарий для проведения эффективного бурения и предотвращения непродуктивных временных событий в процессе бурения. В конечном счете это предотвратит образование прихвата трубы, разрушение скважины и свя-

занную с этим потерю циркуляции раствора, а также повысит эффективность гидротранспорта продуктов буровой выработки и очистку ствола. Стоит отметить, что рассматриваемая MEM-модель громоздка в своей записи, т. к. опирается на полные дифференциальные уравнения в частных производных второго порядка для законов сохранения массы, импульса и энергии с входной информацией о: реальных изменениях тензора деформаций и напряжений в вязкой среде и твердом теле указанной термодинамической системы; весе бурового раствора и его морфологии; физических и механических свойствах системы; геометрической конфигурации (оптимальной траектории ствола скважины). Кроме того, для получения ее корректного решения потребуется дополнительное исследование по обоснованию привлекаемых замыкающих связей для новых неизвестных, а также дополнению уравнений формулировками краевых условий для тепловой, гидродинамической, диффузионной и напряженно-деформируемой соответствующих частей задачи. В результате получаемое решение будет представлять собой решение совместных задач теории упругости и механики гетерогенных неоднородных сплошных сред. Хорошо известно [42–44], что решение таких задач возможно только численными методами и, в свою очередь, содержит проблемы разработки устойчивого, корректного и эффективного численного алгоритма. Наконец, вопросы валидации MEM-модели, верификации ее численного метода, алгоритма расчета, точности методики и установления погрешности полученных численных результатов потребуют привлечения дополнительной эмпирической информации о деталях пространственного изменения искомых локальных и интегральных параметров. Так как последние, в большинстве своем, неизвестны, то подтверждение полученных результатов потребует выполнения кропотливой работы по их сравнению с максимально возможной информацией об особенностях исследуемых процессов, полученных другими методами и экспериментами.

Учитывая высказанное о проблемах, сопровождающих разработку полной геомеханической 3D-MEM-модели, представляется целесообразным остановиться на ряде важных физических положений, позволяющих упростить постановку задачи без потери точности анализируемых процессов и выполнить математическое моделирование прихвата при бурении скважин в сложных по структуре и физическим свойствам пластах. Отметим, что моделирование самого процесса бурения удобно рассматривать в классе задач, решение которых связано:

- 1) с всесторонней геомеханической и геологической оценками пласта для установления и прогноза напряженно-деформируемого состояния

рабочих органов технологического оборудования и окружающей внешней среды в термодинамической системе «порода–скважина–раствор» в формате in-situ;

- 2) прогнозом оптимальных режимов функционирования оборудования по дроблению породы и транспортировке бурового шлама на поверхность;
- 3) уяснением особенностей и закономерностей управления тепло- и гидродинамическими, диффузионными режимами гидротранспорта реологически сложной вязкой гетерогенной смеси (раствор – частицы твердой фазы) по затрубному пространству с криволинейной образующей ствола скважины;
- 4) разработкой эффективной геобурильной системы с мероприятиями персонала по устранению причин нестабильности ствола, интенсификации очистки скважины, увеличению скорости проходки, корректировке методов бурения и упреждению прихвата.

Методология решения. В каждой из указанных задач основная цель посвящена систематическим исследованиям соответственно:

- 1) процессов, обостряющих напряженно-деформируемое состояние вокруг ствола и в непосредственной окрестности его взаимодействия с породой, с необходимостью выявления потенциального пласта, который формирует прихват с учетом детальных сведений о скважине, причинах прихвата с учетом теоретических и экспериментальных данных о морфологии бурового раствора, глинистой корки;
- 2) механизмов прихвата и освобождения трубы с детальным анализом процесса разрушения горных пород в рамках современных подходов, учитывающих фрагментацию пробуренной породы и изменением геометрической формы, размера, массы, физических и механических свойств частиц, скорости бурения, типа долота и выходной мощности, эффектов образования «постельного» слоя отложений, условий их выноса буровым раствором на поверхность;
- 3) гидродинамики и тепломассопереноса в дисперсных системах (жидкость – твердые частицы) при ламинарном и турбулентном течении реологически сложной смеси в эксцентричных трубах в условиях развивающегося по пространству и времени неизотермического потока в полях действия инерционных и массовых сил, в условиях управления морфологическими свойствами неньютоновской вязкой смеси для оптимизации условий гидротранспорта шлама и очистки скважины;
- 4) формулировки превентивных мер по контролю бурового шлама, использованию оптимального веса бурового раствора для управления поровым

давлением, минимизации времени воздействия на ствол скважины и ее мониторинга, выдаче рекомендаций и упреждающих мер для минимизации сил, вызывающих прихват.

Некоторые замечания к постановке задачи и методам ее решения. Для обоснования физических допущений к упрощению математической модели рассматриваемого процесса остановимся на характеристике особенностей, сопровождающих дифференциальный и механический прихват бурильной трубы в термодинамической системе «порода–скважина–раствор», и проиллюстрируем их данными, представленными на рис. 7–14. Так, согласно рис. 7–10, на которых приведены сведения о сути процессов, препятствующих функционированию бурового оборудования, видно, что при дифференциальном прихвате возникают силы реакции из проницаемого пласта, вызванные действием скважинного флюида в условиях, при которых его гидростатическое давление (P_H) становится больше пластового давления флюида (P_F).

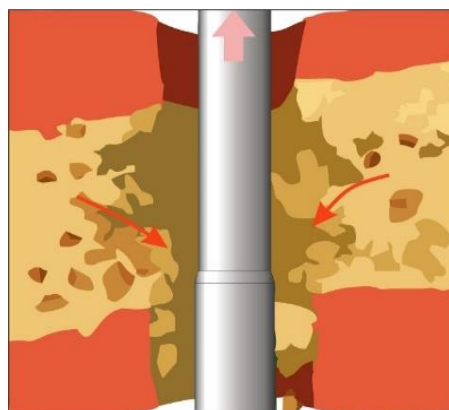


Рис. 7. Дифференциальный прихват в вертикальном участке скважины в пластах с твердо-мягкой структурой (согласно [13, 16, 21])

Fig. 7. Differential pipe sticking in a vertical well section in hard-soft formations (according to [13, 16, 21])

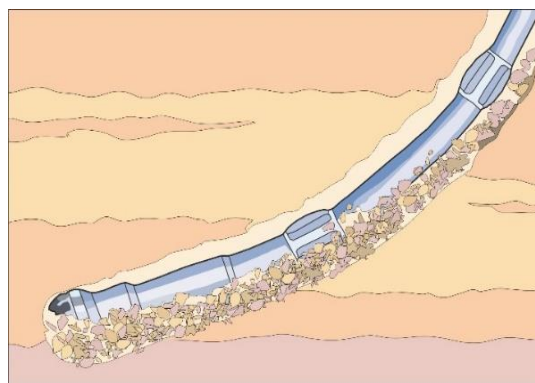


Рис. 8. Проблемная очистка ствола скважины (согласно [21])

Fig. 8. Problematic wellbore cleaning (according to [21])

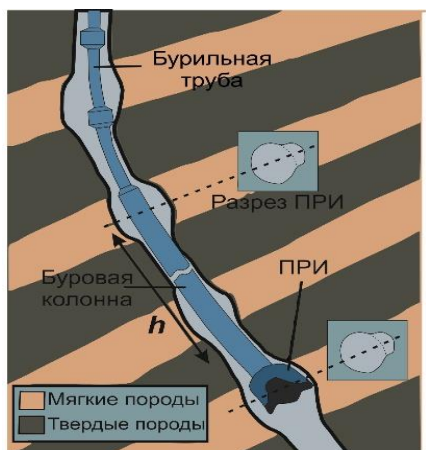


Рис. 9. Дифференциальный прихват в наклонном участке скважины в пластах с твердо-мягкой структурой

Fig. 9. Differential pipe sticking in a deviated well section in hard-soft formations

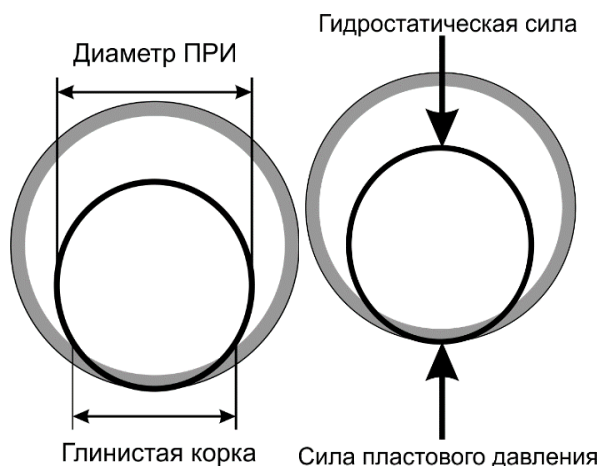


Рис. 10. Гидростатическая и пластовая силы, действующие на буровую трубу (согласно [13, 16, 21])

Fig. 10. Hydrostatic and formation forces acting on the drill pipe (according to [13, 16, 21])

В таких условиях давление бурового раствора ограничивает подвижность рабочих элементов бурового оборудования и способствует формированию фильтрационной корки вокруг застрявших элементов, прочно удерживающей их в статическом положении. Для механического прихвата (рис. 8) характерны процессы воздействия на трубу эффектов, связанных с седиментацией частиц буровой выработки, существенно препятствующих очистке ствола и формированием по периметру трубы крупного по размеру «постельного» слоя полидисперсных частиц шлама. Заметим, что установление условий для эффективного гидротранспорта этих частиц буровым раствором представляет отдельную задачу, важную в исследованиях

проблем гидродинамики и тепломассопереноса гетерогенных смесей с целью прогноза оптимальных режимов течения смеси в поле действия спектра внешних и внутренних сил, препятствующих седиментации частиц и предупреждающих аварийные ситуации (согласно целям MEM-модели для 1–4 задач). Причем в качестве входных данных для построения решения MEM-модели, как правило, важны результаты, полученные в режиме *in-situ*, о поведении параметров, вызывающих прихват трубы, таких как нагрузка на долото, коэффициент трения, скорость проходки, силы сопротивления, плавучести, вращения, крутящего момента, тяжести, контакта, морфологии, веса бурового раствора и т. д. (например, рис. 9–14). Именно эти сведения помогут выявить потенциальный пласт, который вызовет прихват трубы буровым раствором. И эти данные необходимы для включения в математическую постановку задачи в качестве набора условий для формулировки краевых условий в виде связей для определения геометрической, теплофизической, теплогидродинамической и диффузионной конфигураций задачи для геомеханической буровой MEM-модели. Поэтому сведения об особенностях, осложняющих бурение и сопровождающих прихваты на месторождениях Южного Ирака, представленные выше в результате анализа инцидентов со скважины А, В, а также результаты с этих месторождений, сбор данных о закономерностях проведения экспериментов с буровыми растворами (раздел статьи «Инциденты с прихватом труб») весьма полезны в части дополнений постановки задачи. В частности, проведенный библиографический анализ проблемы моделирования прихвата указывает, что для математической постановки задачи и использования 3D-MEM-модели полезно иметь сведения (рис. 9–14) о деталях КНБК, где d – хорда поперечного сечения буровой колонны, определяемая степенью заглубления в глинистой корке (рис. 9).

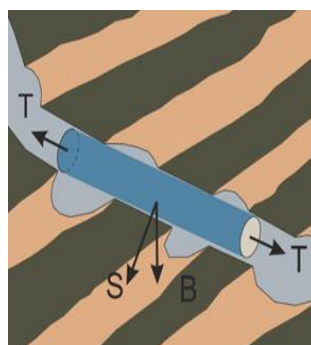


Рис. 11. Упрощенная схема распределения сил буровой колонны в наклонном участке скважины

Fig. 11. Simplified scheme of drill string force distribution in the deviated section of the well

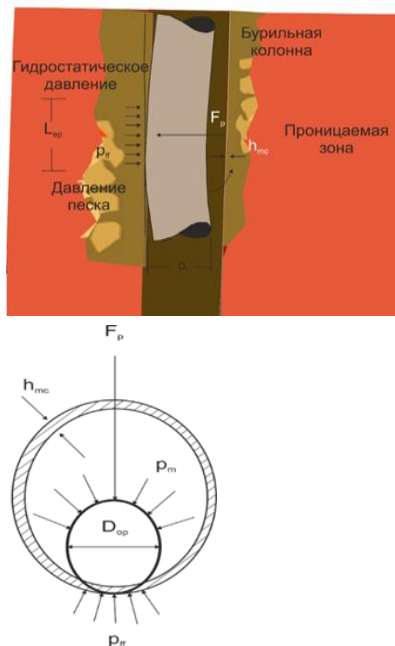


Рис. 12. Распределение сил давления на вертикальном участке скважины при дифференциальном прихвате

Fig. 12. Distribution of pressure forces on the vertical section of the well during differential pipe sticking



Рис. 13. Определяющие силы, действующие на бурильную трубу на преимущественно наклонном участке скважины

Fig. 13. Determining forces acting on the drill pipe in a predominantly deviated section of the borehole



Рис. 14. Определяющие силы, действующие на бурильную трубу в криволинейной области скважины

Fig. 14. Determining forces acting on the drill pipe in the curvilinear region of the borehole

Параметр h – эффективная длина бурильной колонны, контактирующей со стенкой скважины и глинистой коркой (рис. 10). Также из рис. 11, 12 видно, что сила в нормальном направлении к стенке скважины генерируется всякий раз, когда происходит прихват. Причем чем больше площадь проецируемого открытого пространства между стенкой и бурильной трубой, т. е. изменение в диапазоне между d и h , тем больше сила сцепления. Общий анализ сил, вызывающих прихват, указывает на то, что если сумма таких сил, как вес бурильной колонны, силы сопротивления вдоль ствола скважины, силы дифференциального прихвата, превышает предел прочности/текучести бурильных труб, возникнет прихват. Из рис. 9 также следует, что максимальное значение d – это наружный диаметр бурильной трубы, а максимальное значение h – длина бурильной колонны. Анализ данных рис. 7–14 подчеркивает важность исследования НДС системы (1 задачи) для установления картины пространственного изменения компонентов тензора напряжений вокруг длины бурильной трубы, результаты которой будут использоваться в формулировке сопряженных граничных условий в записи краевых задач на этапе исследований гидродинамики и тепло- и массопереноса в термодинамической системе «порода–скважина–раствор» (составляющих суть 2–4 задач). Как отмечалось выше, построение решения задач 1–3 геомеханической системы бурения проводится в рамках численного моделирования и сопровождается проблемами разработки эффективного и оптимального алгоритма интегрирования определяющих уравнений. Этот процесс требует внимания к валидации модели, верификации подхода, метода решения, а также полученных на ее основе результатов. В этом отношении следует выполнить большой объем работы по выяснению степени надежности численного алгоритма, сопоставлению полученных результатов как с имеющимися экспериментальными/теоретическими данными других авторов, так и с известными решениями. В большинстве своем такие решения соответствуют анализу рассматриваемых процессов переноса, деформаций среды с подобной геометрической конфигурацией пространства. Тогда для оценки точности полученных результатов моделирования можно воспользоваться данными исследований НДС среды, гидродинамики и тепломассопереноса в гомогенных и гетерогенных смесях с ньютоновской и неньютоновской реологией других авторов. Полученные заключения о корреляции результатов теории/моделирования/эксперимента следует использовать в качестве дополнительного материала к уточнению (по мере необходимости) как математической модели, так и численного метода/подхода, алгоритма ее реализации. Принимая во внимание

представленные замечания о методологии исследования, перейдем к формулировке самой математической части геомеханической бурильной МЕМ-модели. При этом для начала целесообразно остановиться на особенностях математической постановки 2–3 задач и отдельных их результатах, полезных при исследовании гидротранспорта двухфазных сред по затрубному пространству эксцентричных скважин с произвольной ориентацией ее ствола.

Моделирование гидродинамики и тепломассопереноса в гетерогенных вязких смесях со сложной реологией

Физическая постановка. Заметим, что подобные исследования достаточно подробно изложены, например, в [42–51]. Отмечалось, что численное моделирование определяющих уравнений представленной математической модели выполнено в рамках физических допущений о движении и седиментации частиц бурового шлама на нижней поверхности наклонного участка скважины. Причем такие допущения характерны для сценария бурения в режиме *in situ*, где в системе «порода–скважина–оборудование» проявляются эффекты от изменения скорости бурения, площади и диаметра долота, объема и плотности частиц, состава и строения породы. Комплексные эффекты от деформационных, динамических и диффузионных процессов в породе и текущей дисперсной смеси со сложной реологией интенсифицируют процессы взаимодействия узлов оборудования с загромождением сечения частицами выработки. А это, в свою очередь, вызывает неблагоприятные эффекты *заклинивания и прихвата труб*. Моделирование гидродинамики в условиях ламинарного и турбулентного режима течения смеси выполняется в предположении, что объемная доля твердых частиц определяется величиной порядка $\alpha_p < O(10^1)$, причем эффект от их соударений друг с другом пренебрежимо мал. Более того, отмечается, что по пространству скважины формируется течение капельной несжимаемой жидкости, осложненное нестационарными эффектами загрузки твердых частиц на входе в скважину (в результате дробления породы), а также эффектами от прямого и закрученного, вязкостно-инерционно-гравитационного и изотермического, стационарного по условиям входа потока. Распределение загрузки монодисперсных частиц соответствует однородному профилю постоянной интенсивности за единицу времени рабочего процесса. В указанных физических допущениях особенности, сопровождающие процесс гидротранспорта шлама, его взаимодействие с элементами оборудования в режимах, характерных для прихвата, могут быть предсказаны только в рамках достаточно полных

математических моделей с детальным численным моделированием процессов переноса импульса, тепла и массы в вязкоупругих и напряженно-деформируемых смесях по уравнениям, описывающим локальные изменения теплодинамической и диффузионной *структуры* потока. Тогда можно надеяться, что полученные результаты обоснованно позволят *установить* особенности и закономерности изменений минимально рекомендуемых динамических параметров шлама по скважине, важных для формирования безаварийных условий функционирования оборудования при бурении и предотвращения прихвата.

Формулировка математической модели процесса гидротранспорта смеси

При моделировании течения дисперсной среды следует учитывать прогресс эйлерово-эйлерова (ЭЭ) и эйлерово-лагранжева (ЭЛ) подходов в описании течений гетерогенных сред, которые составляют основу популярных программных пакетов, например, CFD FLUENT. Наш опыт моделирования движения смеси по эксцентричным трубам с горизонтальной и наклонной ориентацией в рамках ЭЭ- и ЭЛ-подходов (продемонстрированный, например, в [42–48]) указывает, что CFD FLUENT успешен в широком диапазоне изменений определяющих параметров. Сама физико-математическая модель (5)–(20) с системой дифференциальных уравнений законов сохранения массы (5), импульса (6) для частиц жидкой фазы (параметры с индексом “*f*”), замыканиями для тензора напряжений (τ) (7), скоростей деформаций ($\dot{S}$) (7), сил межфазного взаимодействия (S_f) (6), многопараметрической моделью турбулентности второго порядка для рейнольдсовых напряжений (10) RANS-подхода ($RSS - k\omega - SST/kL$ с опорной базой для транспортного уравнения типа $r = \omega, L$ (11)–(20)), а также положениями ЭЛ-подхода к расчету твердых частиц (параметры с индексом “*p*”) (21)–(23) имеет общий вид:

$$\frac{\partial(\alpha \rho_f)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha \rho_f \mathbf{v}_f) = 0; \quad (5)$$

$$\frac{\partial(\alpha \rho_f \mathbf{v}_f)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha \rho_f \mathbf{v}_f \mathbf{v}_f) = -\alpha \nabla p + \nabla \cdot (\alpha \tau^\Sigma) + S_f + \alpha \rho_f \mathbf{g}; \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \tau^\Sigma &= \tau_L + \tau_T, \tau_L = 2\mu \dot{S} - \frac{2}{3}(\mu \nabla \cdot \mathbf{v}_f) \mathbf{I}, \dot{S} = \\ &= 0.5[\nabla \mathbf{v}_f + (\nabla \mathbf{v}_f)^T], S_f = \sum_{i=1}^2 \left(\frac{\mathbf{F}_{f,i}}{V} \right); \end{aligned} \quad (7)$$

$$\sum_{i=1}^2 \mathbf{F}_{f,i} = \mathbf{F}_a + \mathbf{F}_D, \mathbf{F}_a = -\frac{1}{6} \pi d^3 \rho_f \mathbf{g}; \quad (8)$$

$$\tau_T = 2\mu_i[\dot{S} - \frac{1}{3}k \cdot \mathbf{I}], \quad k = \frac{\bar{\rho}_f \overline{u'_i u'_i}}{2}, \quad i = \overline{1, 3}; \quad (9)$$

$$C_{ij} = D_{ij} + P_{ij} + R_{ij} + \varepsilon_{ij}; \quad (10)$$

$$C_r = D_r + P_r + \varepsilon_r; \quad (11)$$

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

$$\left\{ \begin{array}{l} \mu = \mu_{\text{пред}}, \dot{S} < \frac{\tau_0}{\mu_{\text{пред}}}; \\ \mu = \frac{\tau_0 + \kappa[\dot{S}^n - (\tau_0 / \mu_{\text{пред}})^n]}{\dot{S}}, \dot{S} \geq \frac{\tau_0}{\mu_{\text{пред}}}. \end{array} \right. \quad (12)$$

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_i k)}{\partial x_i} =$$

$$= \frac{\partial}{\partial x_i} \left[(\mu + \sigma_k \mu_i) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + \tilde{P}_k - \beta^* \rho k \omega; \quad (13)$$

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_i \omega)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[(\mu + \sigma_\omega \mu_i) \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \right] +$$

$$+ \alpha \rho S^2 - \beta \rho \omega^2 + 2(1 - F_1) \rho \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i}; \quad (14)$$

$$F_1 = \tanh \left\{ \left[\min \left[\max \left(\frac{k^{0.5}}{\beta^* \omega y}, \frac{500 \nu}{y^2 \omega} \right), \frac{4 \rho \sigma_{\omega 2} k}{CD_{k\omega} y^2} \right] \right]^4 \right\}, \quad (15)$$

$$CD_{k\omega} = \max \left(2 \rho \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i}, 10^{-10} \right), \quad (16)$$

$$v_i = \frac{\alpha_1 k}{\max(\alpha_1 \omega, SF_2)},$$

$$F_2 = \tanh \left\{ \left[\max \left(\frac{k^{0.5}}{\beta^* \omega y}, \frac{500 \nu}{y^2 \omega} \right) \right]^2 \right\}, \quad (17)$$

$$P_k = \mu_t \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) \rightarrow$$

$$\rightarrow \tilde{P}_k = \min(P_k, 10 \cdot \beta^* \rho k \omega), \quad (18)$$

$$\beta^* = 0.09, \quad \alpha_1 = 5/9, \quad \alpha_2 = 0.44,$$

$$\beta_1 = 3/40, \quad \beta_2 = 0.0828, \quad (19)$$

$$\sigma_{k1} = 0.85, \quad \sigma_{k2} = 1, \quad \sigma_{\omega 1} = 0.5, \quad \sigma_{\omega 2} = 0.856. \quad (20)$$

$$m_p \frac{\partial \mathbf{v}_p}{\partial t} = \mathbf{F}_v + \mathbf{F}_D + \mathbf{F}_{pres} + \mathbf{F}; \quad (21)$$

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

$$= \frac{c_d \rho_f A_p}{2} |\mathbf{v}_f - \mathbf{v}_p| (\mathbf{v}_f - \mathbf{v}_p); \quad (22)$$

$$c_d = a_1 + \frac{a_2}{\text{Re}} + \frac{a_3}{\text{Re}}, \quad \text{Re} = \frac{\rho_f^0 d_p |\mathbf{v}_f - \mathbf{v}_p|}{\mu_f},$$

$$A_p = \frac{\pi d_p^2}{4}, \quad V_p = \frac{1}{6} \pi d_p^3. \quad (23)$$

Заметим, что в иллюстрации особенностей формулировки модели гидротранспорта (5)–(23) все обозначения ее переменных и параметров полностью идентичны детальному описанию, представленному, например, в [45–51], и по соображениям краткости здесь опущены.

Краевые условия задачи составляют следующие блоки. *Геометрическая часть* определяет особенности рабочего пространства течения смеси. *Динамическая часть* включает условия для задания структуры потока на входе. *Диффузионная часть* отвечает заданию состава (α_i) входящей смеси. *Начальные условия* для твердых частиц отвечают заданию их распределений на входе в скважину за единицу времени с учетом бурения в виде: $N_i(t) = N_i^0 + [(t - t_0)/\Delta t]C$, здесь C – величина ввода i -й частицы за сек, $[c^{-1}]$, где $C = RS_d/V_p$, R – скорость бурения, S_d – площадь долота, V_p – объем частицы, N_i^0 – распределение i -й частицы в начальный момент времени. *Граничные условия* отвечают формированию изотермического течения в эксцентричном затрубном пространстве скважины (на входе дисперсной смеси, внешней границе кольцевой зоны, стенке внутренней трубы, выходе). Соответственно, на входе – однородные профили фаз, на выходе – условия непрерывности течения, на стенках – для несущей и дисперсной фазы прилипания капельной жидкости, отсутствия проскальзывания. При определении поля давления используется стандартная процедура PISO (расширение алгоритма SIMPLE [45–48]), а также алгоритм Strong Coupling, ПО ANSYS CFD, учитывающий детали внутри- и межфазного взаимовлияния между частицами капельной жидкости и твердыми частицами.

Сходимость численного метода интегрирования определяющих уравнений системы (5)–(23) отвечает выполнению критерия вида (24):

$$\max_{i,j,k} \left\{ \left| \frac{\Phi_{i,j,k}^{m+1} - \Phi_{i,j,k}^m}{\Phi_{i,j,k}^{m+1}} \right| \right\} \leq \Delta_\Phi, \quad \Delta_\Phi = O(10^{-3}), \quad \%, \quad (24)$$

где $(\Phi = \{\mathbf{v}_f, \mathbf{v}_p, \overline{v'_i v'_j}, k, \varepsilon, \omega, L\})$ и ее интегральные значения (например, $\Phi_{wf} = \tau_{wf}$ – сопротивления трения) характеризуют состояния смеси на двух последних итерациях ($m, m+1$). Особенности численного метода и алгоритма детально изложены, например, в [45–51].

Таблица. Характерные параметры моделирования процессов гидротранспорта в системе «коллектор–смесь–скважина»

Table. Typical parameters for modeling hydraulic transport processes at “collector–mixture–well” system

дисперсная среда (твердая фаза – песок; капельная фаза – жидкость) disperse medium (solid phase – sand; droplet phase – liquid)	форма частиц particle shape	плотность, кг/м ³ density, kg/m ³	диаметр, м diameter, m	Реология Rheology
	одномерные, шарообразные one-dimensional, spherical	(2,6–2,7)·10 ³	0,006	неньютоновская типа Гершеля–Балкли non-Newtonian Herschel–Bulkley
режим бурения drilling mode	реальная скорость твер- дых частиц, вход, v_p , м/с actual solids velocity, inlet, v_p , m/s	скорость бурения, м/ч drilling speed, m/h	масса загруженных частиц, кг mass of load particles, kg	динамика вязкого потока, Re viscous flow dynamics, Re
	0	9–14	1,9–1,94	(0,02–2,6)·10 ⁵
геометрия скважины well geometry	внешний диаметр, м outer diameter, m	внутренний диаметр, м internal diameter, m	длина, м length, m	эксцентрисичность, % eccentricity, %
	0,2	0,12	12	70

Результаты и их анализ. Отметим, что расчеты комплексных гидродинамических и диффузионных процессов, сопровождающих гидротранспорт буровой выработки по эксцентричному затрубному пространству наклонного и горизонтального участка скважины, а также способных обострить эффекты, ответственные за формирование прихвата буровой трубы, выполнены при значениях определяющих параметров, представленных в таблице.

На рис. 15–18 представлены отдельные сведения о картинах изменений динамической и диффузионной структуры потока по длине скважины, позволяющие уяснить проблемы выноса шлама из скважины и предотвращения прихвата.

Численный анализ динамической структуры смеси указывает, что влияние реологических параметров (предела текучести, индекса потока и консистенции, (12)) на скорость накопления шлама весьма существенно. Установлено, что с повышением предела текучести (τ_0), а также с уменьшением индексов потока (n) и консистенции (k) можно сформировать условия для интенсивной очистки скважины и предотвратить случаи прихвата.

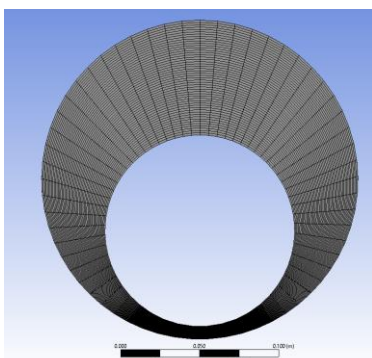


Рис. 15. Разносная сетка к расчету гидротранспорта шлама

Fig. 15. Spacing grid for calculating cutting hydraulic transport

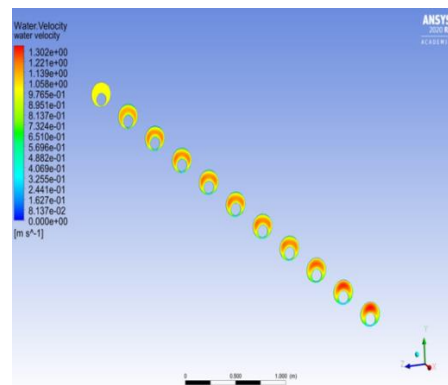


Рис. 16. Изменение осевой компоненты вектора скорости раствора по длине горизонтального участка скважины в условиях: $Re=10^4$, $L=10$ м, $R_2=0,2$ м, $R_1=0,1$ м в сечениях с интервалом в 1 м

Fig. 16. Change in the axial component of the solution velocity vector along the length of the horizontal section of the well under the conditions: $Re=10^4$, $L=10$ m, $R_2=0.2$ m, $R_1=0.1$ m in sections with an interval of 1 m

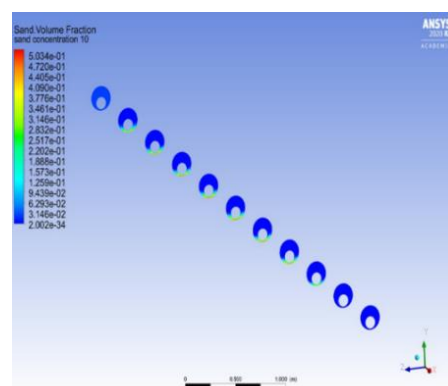


Рис. 17. Изменение объемной доли частиц песка, предсказанное в рамках ЭЭ метода. Условия аналогичны данным рис. 16

Fig. 17. Variation of the volume fraction of sand particles predicted within the Eulerian–Eulerian method. The conditions are similar to the data of Fig. 16

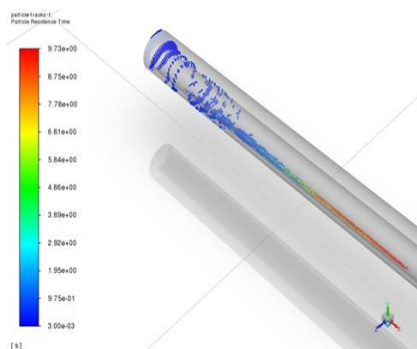


Рис. 18. Изменения объемной доли частиц твердой фазы, предсказанные в рамках ЭЛ метода. Условия аналогичны данным на рис. 16

Fig. 18. Changes in the volume fraction of solid phase particles predicted within the framework of the Eulerian-Lagrangian method. The conditions are similar to the data in Fig. 16

Так, из рис. 16–18 следует, что в развивающемся потоке (в режимах $Re=idem$, $Fr=idem$ и с различной загрузкой) твердые частицы локализуются в нижней части поперечного сечения (рис. 17, 18).

В этой зоне интенсифицируется их взаимодействие со стенкой трубы. Причем при прочих равных условиях увеличение загрузки частиц на входе приводит к относительному росту как размеров области, так и концентрации количества транспортируемых частиц с более высокими абсолютными скоростями течения. Также отметим, что увеличение концентрации твердых частиц и среднерасходной скорости потока в области входа приводит к тому, что перенос твердых частиц в горизонтальной плоскости по длине трубы заметно возрастает. В пристеночной зоне интенсифицируются конвективно-диффузионные процессы переноса импульса, массы компонентов смеси, осложненные влиянием массовых сил (суть влияния гравитационного эффекта). Более того, расчеты показывают, что в режимах течения в трубах, отличающихся ростом интенсивности турбулентности, числа Re , а также увеличением локальных параметров турбулентных вихрей (например, k , L , ω , ε и т. п.) следует ожидать интенсификации молярного процесса переноса импульса, массы за счет повышенных значений однородных и смешанных моментов второго и третьего порядка между пульсациями вектора скорости, давления и частиц твердой фазы. Это приводит к тому, что структура пульсационного течения становится неоднородной и анизотропной. В таких условиях использование моделей RANS-подхода со скалярными коэффициентами молярного переноса импульса и массы (например, модели типа $k-\varepsilon/\omega/L$ [45]) проблематично. Расчетами фиксируется тенденция, характерная для развивающегося турбулентного течения, что рост интенсивности турбу-

лентности и более высокие значения загрузки концентрации твердых частиц приводят к формированию более выраженной «узкой зоны высоких градиентов» с переходными ламинарно-турбулентными явлениями в структуре пристеночного течения и турбулентного пограничного гидродинамического и диффузионного слоев. Это способствует относительному смещению горизонтальной области интенсивного пристеночного течения от нижней стенки трубы в ядро потока и интенсифицирует турбулентное течение в пристеночной зоне (рис. 16–18). Более того, из информации о развитии дисперсного течения по длине скважины следует, что при небольшой загрузке твердых частиц во входящий в трубу турбулентный поток с относительно невысокими числами Рейнольдса ($Re=0,5...1 \cdot 10^4$) формируется течение с характерной асимметричностью распределения осевой компоненты вектора скорости твердых частиц в радиальном выходном сечении гидродинамически стабилизированного потока. Также выполненные исследования изменений напряжений сдвига твердых частиц показывают, что напряжения τ_{xr} , $\tau_{r\varphi}$ способны существенно обострять деформационные процессы вокруг буровой трубы и интенсифицировать эффекты прихвата рабочих элементов оборудования в процессе бурения. Так, при относительно небольших нагрузках твердых частиц в области входа потока с интенсивной турбулентностью ($Re=O(10^5)$) в донной части горизонтального участка трубы формируется зона «слабоинерционного» течения, где из-за относительно высокой молекулярной вязкости смеси наблюдается седиментация частиц. Эти процессы приводят к росту напряжения сдвига по поверхности буровой трубы, взаимодействующей с большей массой осаждаемых частиц шлама. Стоит отметить, что в своем большинстве указанные проблемы прогноза прихвата, их корректного моделирования в рамках положений механики гетерогенных смесей *открыты и еще ждут* своего окончательного решения в рамках использования 3D-MEM-подхода. В целом из рис. 16–18 следует, что в определенных условиях течения смеси нелинейные эффекты совместного взаимодействия поверхностных и массовых сил на структуру потока способны приводить к асимметрии распределения радиальной компоненты вектора скорости твердых частиц в силу их реакции на механизмы процессов переноса импульса и массы, составляющих суть определяющих критериев подобия (Re , Fr , Pe_d , Sm и т. п.) рассматриваемой задачи. Также стоит отметить, что установленная нетривиальность эффектов от поведения поля скорости в развивающемся потоке, изменений в динамической и диффузионной структуре частиц смеси, реологических эффектов от нелинейности

изменений напряжений со скоростями деформаций в фазах будут *обострять механизмы* прихвата буровой трубы. Поэтому стоит ожидать, что при высоких значениях загрузки частиц и при вращении трубы крупные неоднородности буровой выработки начнут разрушаться. Это приведет к *ламинаризации течения*. Эти вопросы могут составить предмет для перспективных будущих исследований. Видно, что в комплексном анализе проблем прихвата обращение к полнофакторной геомеханической 3D-MEM-модели является оправданным.

Заключение

Проведенное исследование позволяет сделать следующие выводы.

1. Эксплуатация оборудования в условиях прихвата указывает на то, что скважины имеют ограничения по времени воздействия на открытый ствол, поэтому проблемные пласты должны быть обсажены как можно раньше.
2. Для предотвращения дорогостоящих операций по восстановлению оборудования при прихвате необходим обмен опытом по установлению механизмов образования шлама.
3. Сценарий прихвата должен быть детально проанализирован, а основные выводы должны быть распространены среди всех сторон, участвующих в разработке месторождения.
4. В процессе бурения реакция бурильщика является ключевым фактором в определении прихвата. Его можно избежать, если происходит детальное изучение деформационных и динамических процессов в скважине.
5. Одним из решений для предотвращения бурения через трещиноватые/истощенные коллекторы является применение бурения под управляемым давлением.
6. При анализе прихвата обращение к геомеханической 3D-MEM-модели представляется обоснованным. На ее основе можно установить причины прихвата, поддерживать те режимы, при которых реально возможно смягчение его негативных эффектов. Например, через факты учета НДС системы «порода–скважина–раствор», особенностей изменений морфологии, теплофизики, геомеханики среды. Подход доказал свою эффективность при решении отдельных проблем прихвата: минимизации площади контакта между пластом и трубой, интенсификации очистки скважины от бурового шлама, формировании условий стабильности ствола скважины. 3D-MEM-модели позволяют быстро обнаружить места заклинивания оборудования по информации о распределении напряжений по периметру ствола, предложить меры по освобождению трубы, оценить глубину прихвата и

рассчитать крутящий момент и осевое усилие, необходимые для освобождения прихвата. Все это гарантирует, что 3D-MEM-модель бурения будет полезна для инженерного анализа.

Практические рекомендации персоналу сводятся к следующему.

1. Когда возможно, колонна должна находиться в постоянном движении, чтобы обеспечить корректную очистку.
2. Частицы LCM среднего размера, превышающие 1/3 размера самых маленьких насадок долота, не должны использоваться при устранении потерь. Опыт показывает, что закачиваются концентрации LCM при значениях более 50 фунтов на квадратный дюйм при потерях до 50 баррелей в час. Более плотные концентрации могут оказаться неэффективными и приведут к образованию крупной корки.
3. При снижении дебита из-за потерь циркуляции скважина может стать более грязной. Свойства бурового раствора должны тщательно контролироваться. Повышение его вязкости при низкой скорости сдвига может способствовать очистке скважины. Кроме того, потери бурового раствора по API должны быть как можно ниже, чтобы предотвратить чрезмерное образование фильтрационной корки на проницаемых уровнях.

Проанализированные особенности сценариев прихвата на Южных месторождениях Ирака позволяют отметить.

Для обеспечения эффективной очистки скважины предлагается закачивать таблетки высокой вязкости через регулярные промежутки времени (например, через 15 минут или каждые два часа). Таблетки следует добавлять к буровому раствору, что сформирует надлежащую условиям морфологию смеси.

Важно учитывать в практике бурения, что в открытом стволе скважины не следует оставлять рабочую колонну неподвижной, за исключением операций наращивания инструмента. Стоит всегда следить за тем, чтобы колонна совершала возвратно-поступательные и вращательные движения.

Анализ показывает, что целесообразно увеличить плотность бурового раствора до $1,20 \text{ г/см}^3$ перед входом в пласты Танума и Нахр Умр до 50 м. Кроме того, при входе в пласт Нахр Умр предлагается закачивать таблетки, включающие уплотняющие и CaCO_3 материалы не только во время бурения, но и при других операциях, таких как спуско-подъемные и т. д.

Эквивалентная циркулирующая плотность должна контролироваться. В этом отношении лучшими практиками являются плавный запуск насоса и разрушение гелей. Максимальный расход применяется только в том случае, если это необходимо

для хорошей очистки скважины. А уменьшение расхода требуется в условиях, когда буровые колонны находятся перед сланцами, осуществляется контроль свойств бурового раствора, проводится минимизация давления всплывания/подкачки.

Целесообразно использование двух роликовых расширителей в КНБК на оптимальных расстояниях для уменьшения расслаивания и предотвраще-

ния узких мест при расширении, обратной проходке и спуске очистителя.

В случае прихвата трубы в известняковом пласте требуется закачать 22%-ю HCl/HF кислоту для охвата кольцевого пространства от долота до вершины карбонатного пласта и убедиться, что кислотная таблетка впиталась в течение двух часов при попытке вращения колонны.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Automated decision support and expert collaboration avoid stuck pipe and improve drilling operations in offshore Brazil subsalt well / S.B. Ferreira, A.P.L.A. Carvalho, D.J.L. Rodrigues, R.M. Schnell, D.M. Thomson, I.J. Baptista, R.C. Alves // *Proceedings of Annual Offshore Technologic Conference*. – 2015. – Vol. 3. – P. 2135–2144. DOI: 10.4043/25838-ms.
2. Elmousalami H.H., Elaskary M. Drilling stuck pipe classification and mitigation in the Gulf of Suez oil fields using artificial intelligence // *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*. – 2020. – Vol. 10. – № 5. – P. 2055–2068. DOI: 10.1007/S13202-020-00857-W/FIGURES/11.
3. Segura J.J.W. Drill pipe cutting at ultra high pressure: a proven capability for stuck pipe hazards // *SPE/IADC Drill. Conf. Proc.* – 2011. – Vol. 1. – P. 102–111. DOI: 10.2118/139511-ms.
4. Харламов С.Н., Мехран Д., Филиппов К.А. Математическое моделирование и методы исследования гидродинамической очистки горизонтальных скважин // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2021. – Т. 332. – № 8. – С. 53–73. DOI: 10.18799/24131830/2021/8/3305.
5. Nguyen H.-H., Park J.-H., Jeong H.-Y. A simultaneous Pipe-Attribute and PIG-Pose estimation (SPPE) using 3-D point cloud in compressible gas pipelines // *Sensors*. – 2023. – Vol. 23. – № 3. – P. 1–18. DOI: 10.3390/s23031196.
6. Al-Rubaii M., Al-Shargabi M., Al-Shehri D. A novel model for the real-time evaluation of hole-cleaning conditions with case studies // *Energies*. – 2023. – Vol. 16. – № 13. – P. 1–28. DOI: 10.3390/en16134934.
7. A comprehensive review of laboratory, field and modelling studies on drilling mud rheology in high temperature high pressure (HTHP) conditions / O.S. Agwu, O.E. Akpabio, J.U. Ekpenyong, M.E. Inyang, U.G. Asuquo, D.E. Eyoh, I.J. Adeoye // *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. – 2021. – Vol. 94. – № 2. – P. 104046. DOI: 10.1016/j.jngse.2021.104046.
8. Al-Haleem A., Al-Razzaq A. Optimization of hole cleaning in Iraqi directional oil wells // *Journal of Engineering*. – 2016. – Vol. 22. – P. 108–116. DOI: <https://doi.org/10.31026/j.eng.2016.07.07>
9. Ринатович Ю.А. Анализ способов профилактики затяжек и прихватов буровых колонн // *Столыпинский вестник*. – 2022. – № 3. – С. 1689–1707.
10. A novel efficient borehole cleaning model for optimizing drilling performance in real time / K.M. Al-Rubaii, M. Al-Shargabi, M. Al-Shehri, D. Alyami, A. Minaev // *Applied Science*. – 2023. – P. 1–28. DOI: 10.3390/app13137751.
11. Novel jet cutter cartridge for eliminating deepwater stuck pipe hazards / Z. Cheng, Yi Tao, C. Liu, R. Yao, Yu- Le Hu, Fang-Fang Ma, Honghao Shen // *Combustion explosion and shock waves*. – 2021. – Vol. 57. – № 1. – P. 122–128. DOI: 10.1134/s0010508221010147.
12. A new down hole tool and approach to release differentially stuck pipe / K.K. Machocki, A. Aljohar, D. Zhan, A. Abegunde // *Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference*. – 2021. – Vol. 15. – P. D011S018R004. DOI: 10.2118/207964-MS.
13. Outline C. Formulas and calculations for petroleum engineering (chapter 2. Drilling engineering formulas and calculations, P. 70–172.). Gulf Professional Publishing: Elsevier Inc., 2019. – 517 p. DOI: 10.1016/B978-0-12-816508-9.00002-0.
14. Battle of the water calibration networks / E. Ostfeld, Avi Salomons, Elad Skolicki, Z. Wadda et al. // *Journal of Water Resources Planning and Management*. – 2013. – Vol. 136. – № 5. – P. 1–10. URL: <http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/41024%28340%2943%5C> (дата обращения 10.05.2024).
15. Ghasemi Kafrudi E., Hashemabadi S.H. Numerical study on cuttings transport in vertical wells with eccentric drillpipe // *Journal of Petroleum Science Engineering*. – 2016. – Vol. 140. – № 4. – P. 85–96. DOI: 10.1016/J.PETROL.2015.12.026.
16. AccuPipePred: a framework for the accurate and early detection of stuck pipe for real-time drilling operations / A. Magana-Mora, S. Gharbi, A. Alshaikh, A. Al-Yami // *SPE Middle East Oil Gas Show Conf. MEOS, Proc.* – 2019. – № 3. DOI: 10.2118/194980-ms.
17. Hole-cleaning performance of gasified drilling fluids in horizontal well sections / E.M. Ozbayoglu, R.E. Osgouei, A.M. Ozbayoglu, H.E. Yuksel // *SPE Journal*. – 2012. – Vol. 17. – № 3. – P. 912–923. DOI: 10.2118/131378-PA.
18. Ekun O.L., Kayode S. Evaluation of differential pressure sticking and stuck pipe in oil and gas drilling technology and its production operations // *World Academy of Science, Journal of Engineering and Technology*. – 2020. – Vol. 7.2. – № 1. – P. 114–130.
19. Support Vector Machine based modeling of an industrial natural gas sweetening plant / H. Adib, F. Shari, N. Mehranbod, N. Moradi // *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. – 2013. – Vol. 14. – P. 121–131. DOI: 10.1016/j.jngse.2013.06.004.
20. Al-Rubaii K.M., Al-Shargabi M., Al-Shehri D.A. A novel automated model for evaluation of the efficiency of hole cleaning conditions during drilling operations // *Applied Science*. – 2023. – Vol. 13. – № 11. – P. 6464–6478. DOI: 10.3390/AP13116464.
21. Mitchell B. *Advanced oilwell drilling engineering handbook*. – Dallas, TX, USA: Society of Petroleum Engineers of the AIME, 1992. – 130 p.
22. Model order reduction for managed pressure drilling systems based on a model with local nonlinearities / S.N. Lordejani, B. Besselink, M.H. Abbasi, G.O. Kaasa, W.H.A. Schilders, N. van de Wouw // *IFAC-Papers on Line*. – 2018. – Vol. 51. – № 8. – P. 50–55. DOI: 10.1016/j.ifacol.2018.06.354.

23. A developed robust model and artificial intelligence techniques to predict drilling fluid density and equivalent circulation density in real time / M. Al-Rubaii, M. Al-Shargabi, B. Aldahlawi, D. Al Shehri, K.M. Minaev // *Sensors*. – 2023. – Vol. 23. – № 14. – P. 1–28. DOI: 10.3390/s23146594.
24. Bangert P. Introduction to machine learning in the oil and gas industry // *Machine Learning and Data Science in the Oil and Gas Industry: best practices, tools, and case studies*. – Cambridge: Gulf Professional Publishing, 2021. – P. 69–81. DOI: 10.1016/b978-0-12-820714-7.00004-2.
25. Stuck pipe mitigating during drill pipe connection using rotation continuous circulation tool / H. Alhamed, A. Alshaarawi, M. Albadran, M. Alshalan // *International Petroleum Technology Conference*. – Dhahran, Kingdom of Saudi Arabia, January 2020. – Paper Number: IPTC-19731-ABSTRACT. DOI: 10.2523/iptc-19731-ms.
26. Харламов С.Н., Мехран Д. Численное прогнозирование потока вязкой каплевой жидкой смеси с твердыми частицами во входном поле эксцентриковых кольцевых труб и очистка их от шлама // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2022. – Т. 333. – № 6. – С. 18–41. DOI: 10.18799/24131830/2022/6/3615.
27. Bayan M.R., Zulkarnain K. Stuck pipe prediction in geothermal well drilling at darajat using statistical and machine learning application // *APCORISE '20: Proceedings of the 3rd Asia Pacific Conference on Research in Industrial and Systems Engineering*. – June 2020. – P. 100–104. DOI: <https://doi.org/10.1145/3400934.3400954>
28. Awadeesian A.M.R., Awadh S.M., Al-dabbas M.A. A modified water injection technique to improve oil recovery: Mishrif carbonate reservoirs in Southern Iraq oil fields, case study // *Iraqi Geological Journal*. – 2019. – Vol. 52. – № 1. – P. 125–146. DOI: 10.46717/igj.52.1.8Ms-2019-06-30.
29. Real time stuck pipe prediction by using a combination of physics-based model and data analytics approach / S. Zhang, F. Islam, A. Zeng, H. Chen, Z. Zeng, Y. Wang, X. Li // *Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference*. – 2019. – № 11. – P. 1–16. DOI: 10.2118/197167-MS.
30. Robust computational approach to determine the safe mud weight window using well-log data from a large gas reservoir / S.S. Beheshtian, S. Rajabi, M. Davoodi, Sh. Wood, D.A. Ghorbani, H. Mohamadian, N. Ahmadi, M. Band // *Marine and Petroleum Geology*. – 2022. – Vol. 142. – № 5. – P. 1–25. DOI: 10.1016/j.marpetgeo.2022.105772.
31. Прогнозирование рисков заклинивания для исключения возможности прихватов технической системы «Перфобур» при бурении разветвленных каналов в терригенных коллекторах / И.А. Лягов, А.Г. Губайдуллин, А.В. Лягов, А.И. Могучев, А. Попов // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2019. – Т. 330. – № 10. – С. 126–136. DOI: 10.18799/24131830/2019/10/2304.
32. Alhisnawy K.T., Ayad A., Alhaleem M. The using of unconventional method depending on well power in the mishrif formation to release differential stuck pipe, Nahr Umr Oil Field, Southern Iraq // *Iraqi Geological Journal*. – 2023. – Vol. 56. – № 2b. – P. 67–74. DOI: 10.46717/igj.56.2B.5ms-2023-8-14.
33. Al-Hameedi S.D.-N., Alkinani H.H. Insights into mechanical and differential pipe sticking with case histories, AADE-19-NTCE-020 // *American Association of Drilling Engineers. National Technical Conference and Exhibition*. – Denver, Colorado, April 9–10, 2019. – P. 1–6.
34. Reservoir drill-in fluid minimizes fluid invasion and mitigates differential stuck pipe with improved production test results / A. Al-Ansari, C. Parra, A. Abahussain, A.M. Abuhamed, R. Pino, M. El Bialy, H. Sadok Mohamed, C. Lopez // *SPE Middle East Oil Gas Show Conf. MEOS, Proc.* – 2017. – Vol. 3. – P. 2304–2316. DOI: 10.2118/183764-ms.
35. Рогов Е.А. Разработка состава технологической жидкости для исключения заклинивания долота // *Записки горного института*. – 2019. – Т. 237. – № 3. – С. 281–284. DOI: 10.31897/pmi.2019.3.281.
36. Nautiyal A., Kumar A. Machine learning approach for intelligent prediction of petroleum upstream stuck pipe challenge in oil and gas industry // *Environment, Development and Sustainability*. – 2022. – P. 1–27. DOI: 10.1007/s10668-022-02387-3.
37. A model for early detection of stuck pipe using random forest algorithm / Jiehong Duan, Yujie Tian, Ethan Long, Wei Long // *Preprint. Research square*. – 2023. – P. 1–20. DOI: <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2528515/v1>.
38. Mohammed S.E., Almahdawi F.H.M. Experimental study for assessment of cutting density effect on hole cleaning efficiency in inclined and horizontal wells // *Iraqi Journal of Chemical and Petroleum Engineering*. – 2020. – Vol. 21. – № 3. – P. 1–8. DOI: 10.31699/ijcpe.2020.3.1.
39. Payrazyan V.K., Robinson T.S. Leveraging targeted machine learning for early warning and prevention of stuck pipe, tight holes, pack offs, hole cleaning issues and other potential drilling hazards // *Offshore Technology Conference*. – 2023. – Vol. 5. – № 1. – P. 1–27. DOI: 10.4043/32169-MS.
40. An intelligent moving window sparse principal component analysis-based case based reasoning for fault diagnosis: case of the drilling process / Y. Han, J. Liu, F. Liu, Z. Geng // *ISA Transaction*. – 2022. – Vol. 128. – P. 242–254. DOI: 10.1016/j.isatra.2021.09.016.
41. Lessons learned from drilling a long open hole interval and recovery from a stuck pipe incident / J. Akinfolarin, A. Amah, O. Ijeh, I. Djauro, Ch. Omoregie, S. Usim, M. Tien, W. Emesi, J. Mordi // *SPE Nigeria Annual International Conference and Exhibition. Virtual*. – August 2020. – Paper Number: SPE-203603-MS. Soc. Pet. Eng. – P. 1–20. DOI: 10.2118/203603-ms.
42. CFD modelling and simulation of drill cuttings transport efficiency in annular bends: effect of particle size polydispersity / E.I. Epelle, W. Obande, J.A. Okolie, T. Wilberforce, D.I. Gerogiorgis // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2022. – Vol. 208. – № 109795. – P. 1–12.
43. Gulraiz S., Gray K.E. Study on the combined effect of thixotropy, particle shape, and particle size on cuttings transport in horizontal annuli // *Powder Technology*. – 2021. – Vol. 392. – P. 703–716.
44. Naderi M., Khamchchi E. Cutting transport efficiency prediction using probabilistic CFD and DOE techniques // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2018. – Vol. 163. – P. 58–66.
45. Kharlamov S.N., Janghorbani M., Bryksin M.R. Aspects of computer simulation of transport and cleaning processes from cuttings in horizontal well sections // *Mathematical Models and Computer Simulations*. – 2023. – Vol. 15. – Iss. 3. – P. 502–519.
46. Харламов С.Н., Джанхорбани М., Зайковский В.В. Транспорт шлама буровым раствором в горизонтальных скважинах. Ч. 1. Моделирование структуры дисперсных течений // *Известия ТПУ. Инжиниринг георесурсов*. – 2023. – Т. 334. – № 10. – С. 34–48.

47. Харламов С.Н., Джанхорбани М., Чернов А.Г. Транспорт шлама буровым раствором в горизонтальных скважинах. Ч. 2. Численные результаты бурения при оптимальных реологических свойствах раствора // Известия ТПУ. Инжиниринг георесурсов. – 2023. – Т. 334. – № 11. – С. 7–24.
48. Харламов С.Н., Джанхорбани М. Численный прогноз движения смеси вязкой каплевой жидкости с твердыми частицами во входной области эксцентричных кольцевых труб и их очистки от шлама // Известия ТПУ. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333. – № 6. – С. 18–41.
49. Харламов С.Н., Фатьянов Д. С. Моделирование пространственных течений вязких сред в системе каналов с участками соединений сложной формы // Известия ТПУ. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 5. – С. 70–88.
50. Харламов С.Н., Джанхорбани М. Численное исследование вязкостно-инерционного ламинарного закрученного течения в круглой трубе с эксцентричным круглым ядром // Известия ТПУ. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 11. – С. 7–21.
51. Харламов С.Н., Джанхорбани М., Брыксин М.Р. Аспекты компьютерного моделирования процессов транспорта и очистки от шлама горизонтальных участков скважин // Математическое моделирование. – 2022. – Т. 334. – № 11. – С. 77–106.

Сведения об авторах

Софян Самеер Ал-обаиди, аспирант, отделение нефтегазового дела, Инженерная школа природных ресурсов, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина 30. Al_obaidi@tpu.ru

Сергей Николаевич Харламов, доктор физико-математических наук, профессор, профессор отделения нефтегазового дела, Инженерная школа природных ресурсов, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина 30. kharsn@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0007-4362-2511>

Поступила в редакцию: 17.05.2024

Поступила после рецензирования: 29.05.2024

Принята к публикации: 31.05.2024

REFERENCES

1. Ferreira S.B., Carvalho A.P.L.A., Rodrigues D.J.L., Schnell R.M., Thomson D.M., Baptista I.J., Alves R.C. Automated decision support and expert collaboration avoid stuck pipe and improve drilling operations in offshore Brazil subsalt well. *Proceedings of Annual Offshore Technologic Conference*, 2015, vol. 3, pp. 2135–2144. DOI: 10.4043/25838-ms.
2. Elmousalami H.H., Elaskary M. Drilling stuck pipe classification and mitigation in the Gulf of Suez oil fields using artificial intelligence. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*. 2020, vol. 10, no. 5, pp. 2055–2068. DOI: 10.1007/S13202-020-00857-W/FIGURES/11.
3. Segura J.J.W. Drill pipe cutting at ultra high pressure: a proven capability for stuck pipe hazards. *SPE/IADC Drill. Conf. Proc.*, 2011, vol. 1, pp. 102–111. DOI: 10.2118/139511-ms.
4. Kharlamov S.N., Mehran J., Filippov K.A. Mathematical modeling and methods of studying hydrodynamic cleaning of horizontal wells. *Bulletin of Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2023, vol. 332, no. 8, pp. 53–73. (In Russ.) DOI: 10.18799/24131830/2021/8/3305.
5. Nguyen H.-H., Park J.-H., Jeong H.-Y. A simultaneous Pipe-Attribute and PIG-Pose estimation (SPPE) using 3-D point cloud in compressible gas pipelines. *Sensors*, 2023, vol. 23, no. 3, pp. 1–18. DOI: 10.3390/s23031196.
6. Al-Rubaii M., Al-Shargabi M., Al-Shehri D. A novel model for the real-time evaluation of hole-cleaning conditions with case studies. *Energies*, 2023, vol. 16, no. 13, pp. 1–28. DOI: 10.3390/en16134934.
7. Agwu O.S., Akpabio O.E., Ekpenyong J.U., Inyang M.E., Asuquo U.G., Eyoh D.E., Adeoye I.J. A comprehensive review of laboratory, field and modelling studies on drilling mud rheology in high temperature high pressure (HTHP) conditions. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2021, vol. 94, no. 2, pp. 104046. DOI: 10.1016/j.jngse.2021.104046.
8. Al-Haleem A.A., Al-Razzaq A. Optimization of hole cleaning in Iraqi Directional oil wells. *Journal of Engineering*, 2016, vol. 22, pp. 108–116. DOI: <https://doi.org/10.31026/j.eng.2016.07.07>
9. Rinatovich Y.A. Analysis of methods of prevention of drill string tightening and sticking. *Stolypinskiy vestnik*, 2022, no. 3, pp. 1689–1707. (In Russ.)
10. Al-Shargabi K.M., Al-Rubaii M., Al-Shehri M., Alyami D., Minaev A. A novel efficient borehole cleaning model for optimizing drilling performance in real time. *Applied Science*, 2023, pp. 1–28. DOI: 0.3390/app13137751.
11. Cheng Z., Tao Yi, Liu C., Yao R., Hu Yu- Le, Ma Fang-Fang, Shen Honghao. Novel jet cutter cartridge for eliminating deepwater stuck pipe hazards. *Combustion explosion and shock waves*, 2021, vol. 57, no. 1, pp. 122–128. DOI: 10.1134/s0010508221010147.
12. Machocki K.K., Aljohar A., Zhan D., Abegunde A. A new down hole tool and approach to release differentially stuck pipe. *Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference*, 2021, vol. 15, pp. D011S018R004. DOI: 10.2118/207964-MS.
13. Outline C. *Formulas and Calculations for Petroleum Engineering* (chapter 2. Mitchell B. Drilling engineering formulas and calculations, P. 70–172.). Gulf Professional Publishing, Elsevier Inc., 2019. 517 p. DOI: 10.1016/B978-0-12-816508-9.00002-0.
14. Ostfeld E., Salomons A., Skolicki E., Wadda Z. Battle of the water calibration networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2013, vol. 136, no. 5, pp. 1–10. Online. Available at: <http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/41024%28340%2943%5C> (accessed 10 May 2024).

15. Ghasemi K.E., Hashemabadi S.H. Numerical study on cuttings transport in vertical wells with eccentric drillpipe. *Journal of Petroleum Science Engineering*, 2016, vol. 140, no. 4, pp. 85–96. DOI: 10.1016/J.PETROL.2015.12.026.
16. Magana-Mora A., Gharbi S., Alshaikh A., Al-Yami A. AccuPipePred: a framework for the accurate and early detection of stuck pipe for real-time drilling operations. *SPE Middle East Oil Gas Show Conf. MEOS, Proc.*, 2019, no. 3. DOI: 10.2118/194980-ms.
17. Ozbayoglu E.M., Osgouei R.E., Ozbayoglu A.M., Yuksel H.E. Hole-cleaning performance of gasified drilling fluids in horizontal well sections. *SPE Journal*, 2012, vol. 17, no. 3, pp. 912–923. DOI: 10.2118/131378-PA.
18. Ekun O.L., Kayode S. Evaluation of differential pressure sticking and stuck pipe in oil and gas drilling technology and its production operations. *World Academy of Science, Journal of Engineering and Technology*, 2020, vol. 7.2, no. 1, pp. 114–130.
19. Adib H., Shari F., Mehranbod N., Moradi N. Support vector machine based modeling of an industrial natural gas sweetening plant. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2013, vol. 14, pp. 121–131. DOI: 10.1016/j.jngse.2013.06.004.
20. Al-Rubaii M., Al-Shargabi M., Al-Shehri D.A. A novel automated model for evaluation of the efficiency of hole cleaning conditions during drilling operations. *Applied Science*, 2023, vol. 13, no. 11, pp. 6464–6478. DOI: 10.3390/APP13116464.
21. Mitchell B. *Advanced oilwell drilling engineering handbook*. Dallas, TX, USA, Society of Petroleum Engineers of the AIME, 1992. 130 p.
22. Lordejani S.N., Besselink B., Abbasi M.H., Kaasa G.O., Schilders W.H.A., Van de Wouw N. Model order reduction for managed pressure drilling systems based on a model with local nonlinearities. *IFAC-Papers on Line*, 2018, vol. 51, no. 8, pp. 50–55. DOI: 10.1016/j.ifacol.2018.06.354.
23. Al-Rubaii M.M., Al-Shargabi M., Aldahlawi B., Al Shehri D., Minaev K.M. A developed robust model and artificial intelligence techniques to predict drilling fluid density and equivalent circulation density in real time. *Sensors*, 2023, vol. 23, no. 14, pp. 1–28. DOI: 10.3390/s23146594.
24. Bangert P. Introduction to machine learning in the oil and gas industry. *Machine Learning and Data Science in the Oil and Gas Industry: best practices, tools, and case studies*. Cambridge, Gulf Professional Publ., 2021. pp. 69–81. DOI: 10.1016/b978-0-12-820714-7.00004-2.
25. Alhamed H., Alshaarawi A., Albadran M., Alshalan M. Stuck pipe mitigating during drill pipe connection using rotation continuous circulation tool. *International Petroleum Technology Conference*. Dhahran, Kingdom of Saudi Arabia, January 2020. Paper Number: IPTC-19731-ABSTRACT. DOI: 10.2523/iptc-19731-ms.
26. Kharlamov S.N., Mehran J. Numerical prediction of flow of viscous drip liquid mixture with solid particles in inlet field of eccentric annular tubes and cleaning them from sludge. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, no. 6, pp. 18–41. (In Russ.) DOI: 10.18799/24131830/2022/6/3615
27. Bayan M.R., Zulkarnain K. Stuck pipe prediction in geothermal well drilling at Darajat using statistical and machine learning application. *Proc. 3rd Asia Pacific Conf. Res. Ind. Syst. Eng.*, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1145/3400934.3400954>.
28. Awadeesian A.M.R., Awadh S.M., Al-dabbas M.A. A modified water injection technique to improve oil recovery: Mishrif carbonate reservoirs in Southern Iraq oil fields, case study. *Iraqi Geological Journal*, 2019, vol. 52, no. 1, pp. 125–146. DOI: 10.46717/igj.52.1.8Ms-2019-06-30.
29. Zhang S., Islam F., Zeng A., Chen H., Zeng Z., Wang Y., Li X. Real time stuck pipe prediction by using a combination of physics-based model and data analytics approach. *Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference*, 2019, no. 11, pp. 1–16. DOI: 10.2118/197167-MS.
30. Beheshtian S.S., Rajabi S., Davoodi M., Wood Sh., Ghorbani D.A., Mohamadian H., Ahmadi N., Band M. Robust computational approach to determine the safe mud weight window using well-log data from a large gas reservoir. *Marine and Petroleum Geology*, 2022, vol. 142, no. 5, pp. 1–25. DOI: 10.1016/j.marpetgeo.2022.105772.
31. Lyagov I.A., Gubaidullin A.G., Lyagov A.V., Moguchev A.I., Popov A. Prediction of jamming risks to prevent sticking of the Perforator technical system when drilling branched channels in terrigenous reservoirs *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 10, pp. 116–136. (In Russ.)
32. Alhisnawy K.T., Alhaleem A.A.M. The using of unconventional method depending on well power in the Mishrif formation to release differential stuck pipe, Nahr Umr Oil Field, Southern Iraq. *Iraqi Geological Journal*, 2023, vol. 56, no. 2b, pp. 67–74. DOI: 10.46717/igj.56.2B.5ms-2023-8-14.
33. Al-Hameedi S.D.-N., Alkinani H.H. Insights into mechanical and differential pipe sticking with case histories. *AADE-19-NTCE-020, American Association of Drilling Engineers. National Technical Conference and Exhibition*. Denver, Colorado, April 9–10, 2019. pp. 1–6.
34. Al-Ansari A., Parra C., Abahussain A., Abuhamed A.M., Pino R., El Bialy M., HadjSadok M., Lopez C. Reservoir drill-in fluid minimizes fluid invasion and mitigates differential stuck pipe with improved production test results. *SPE Middle East Oil Gas Show Conf. MEOS, Proc.*, 2017, vol. 3, pp. 2304–2316. DOI: 10.2118/183764-ms.
35. Rogov E.A. Development of the composition of the process fluid to eliminate bit seizure. *Zapiski Gornogo institute*, 2019, vol. 237, no. 3, pp. 281–284. (In Russ.) DOI: 10.31897/pmi.2019.3.281.
36. Nautiyal A., Kumar A. Machine learning approach for intelligent prediction of petroleum upstream stuck pipe challenge in oil and gas industry. *Environment, Development and Sustainability*, 2022, pp. 1–27. DOI: 10.1007/s10668-022-02387-3.
37. Duan J., Long E. A model for early detection of stuck pipe using random forest algorithm. Preprint. *Research square*, 2023, pp. 1–20. DOI: <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2528515/v1>
38. Mohammed S.E., Almahdawi F.H.M. Experimental study for assessment of cutting density effect on hole cleaning efficiency in inclined and horizontal wells. *Iraqi Journal of Chemical and Petroleum Engineering*, 2020, vol. 21, no. 3, pp. 1–8. DOI: 10.31699/ijcpe.2020.3.1.
39. Payrazyan V.K., Robinson T.S. Leveraging targeted machine learning for early warning and prevention of stuck pipe, tight holes, pack offs, hole cleaning issues and other potential drilling hazards. *Offshore Technology Conference*, 2023, vol. 5, no. 1, pp. 1–27. DOI: 10.4043/32169-MS.
40. Han Y., Liu J., Liu F., Geng Z. An intelligent moving window sparse principal component analysis-based case based reasoning for fault diagnosis: case of the drilling process. *ISA Transaction*, 2022, vol. 128, pp. 242–254. DOI: 10.1016/j.isatra.2021.09.016.

41. Akinfolarin J., Amah A., Ijeh O., Djauro I., Omoregie Ch., Usim S., Tien M., Emesi W., Mordi J. Lessons learned from drilling a long open hole interval and recovery from a stuck pipe incident. *SPE Nigeria Annual International Conference and Exhibition*. Virtual, August 2020. Paper Number: SPE-203603-MS. Soc. Pet. Eng. pp. 1–20. DOI: 10.2118/203603-ms.
42. Epelle E.I., Obande W., Okolie J.A., Wilberforce T., Gerogiorgis D.I. CFD modelling and simulation of drill cuttings transport efficiency in annular bends: Effect of particle size polydispersity. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2022, vol. 208, no. 109795, pp. 1–12.
43. Gulraiz S., Gray K.E. Study on the combined effect of thixotropy, particle shape, and particle size on cuttings transport in horizontal annuli. *Powder Technology*, 2021, vol. 392, pp. 703–716.
44. Naderi M., Khamsehchi E. Cutting transport efficiency prediction using probabilistic CFD and DOE techniques. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2018, vol. 163, pp. 58–66.
45. Kharlamov S.N., Janghorbani M., Bryksin M.R. Aspects of computer simulation of transport and cleaning processes from cuttings in horizontal well sections. *Mathematical Models and Computer Simulations*, 2023, vol. 15, Iss. 3, pp. 502–519.
46. Kharlamov S.N., Janghorbani M., Zaikovskiy V.V. Transport of cuttings by drilling fluid in horizontal wells. Part 1. Modeling the structure of dispersed flows. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2023, vol. 334, no. 10, pp. 34–48. (In Russ.)
47. Kharlamov S.N., Janghorbani M., Chernov A.G. Transport of cuttings by drilling fluid in horizontal wells. P. 2. Numerical results of drilling with optimal rheological properties of the solution. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2023, vol. 334, no. 11, pp. 7–24. (In Russ.)
48. Kharlamov S.N., Janghorbani M. Numerical forecast of the movement of a mixture of viscous droplet liquid with solid particles in the inlet region of eccentric ring pipes and their cleaning from sludge. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, no. 6, pp. 18–41. (In Russ.)
49. Kharlamov S.N., Fatyanov D.S. Modeling of spatial flows of viscous media in a system of channels with sections of connections of complex shape. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 5, pp. 70–88. (In Russ.)
50. Kharlamov S.N., Janghorbani M. Numerical study of viscous-inertial laminar swirling flow in a round pipe with an eccentric round core. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 11, pp. 7–21. (In Russ.)
51. Kharlamov S.N., Janghorbani M., Bryksin M.R. Aspects of computer modeling of transport processes and slurry cleaning of horizontal sections of wells. *Mathematical modeling*, 2022, vol. 34, no. 11, pp. 77–106. (In Russ.)

Information about the authors

Sofyan Sameer Al-obaiddi, Postgraduate Student, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. Al_obaiddi@tpu.ru

Sergey N. Kharlamov, Dr. Sc., Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. kharsn@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0007-4362-2511>

Received: 17.05.2024

Revised: 29.05.2024

Accepted: 31.05.2024

УДК 534.29.66.084:534-13
DOI: 10.18799/24131830/2024/8/4395
Шифр специальности ВАК: 2.6.13

Повышение эффективности коагуляции в резонансных промежутках за счет формирования акустических течений

В.Н. Хмелев, В.А. Нестеров[✉], А.В. Шалунов, С.А. Терентьев

Алтайский государственный технический университет, Россия, г. Бийск

[✉]nva@bti.secna.ru

Аннотация. *Актуальность* исследования обусловлена острой необходимостью ликвидации загрязнений окружающей среды промышленными выбросами различных твердых частиц. При этом максимальное внимание уделяется очистке отходящих газов от частиц размером 2,5 мкм и менее. Одним из наиболее перспективных способов повышения эффективности существующего газоочистного оборудования при улавливании таких частиц является их коагуляция за счет воздействия на газовый поток высокоинтенсивными акустическими колебаниями ультразвуковой частоты. Однако при низкой концентрации, даже при максимально допустимом уровне звукового давления, эффективность коагуляции частиц размером менее 2,5 мкм недостаточна для увеличения степени улавливания газоочистного оборудования. Поэтому существует настоятельная необходимость поиска новых путей дальнейшего повышения эффективности ультразвуковой коагуляции частиц размером менее 2,5 мкм. **Цель:** определение условий формирования вихревых потоков в ультразвуковых полях с максимальным по уровню звукового давления ультразвуковым воздействием; проведение сравнительных исследований процесса коагуляции частиц с размером 2,5 мкм при наличии вихревых потоков и без них. Это позволит определить реальные значения повышения эффективности УЗ-коагуляции при турбулизации газодисперсного потока акустическими течениями в сравнении с коагуляцией в равномерном УЗ-поле и без него. **Объекты:** процесс коагуляции частиц под воздействием однородного и неоднородного ультразвуковых полей. **Методы:** Компьютерное моделирование формируемого ультразвукового поля методом конечных элементов с помощью гармонического акустического анализа. Моделирование и разработка дисковых излучателей методом конечных элементов в модальном анализе. Рассматривается экспериментальный метод исследования процесса объединения частиц под воздействием ультразвуковых колебаний. Для определения характеристик аэрозоля при проведении экспериментальных исследований использован измеритель ТИПАС-1, основанный на методе малоуглового рассеяния и методе спектральной прозрачности. **Результаты.** Представлены результаты исследований процесса коагуляции частиц размером 2,5 мкм и менее в ультразвуковом поле, формируемом в резонансных промежутках колеблющимися дисковыми излучателями. Предложен новый путь повышения эффективности коагуляции в резонансных промежутках за счет применения ультразвуковых дисковых излучателей, способных формировать в резонансных промежутках чередующиеся зоны максимальных и минимальных по амплитуде колебаний. Создание таких зон обеспечило формирование акустических течений вихревого типа, способных перемещать частицы в пределах узловых областей стоячей волны и между ними. Вовлечение в формируемые течения мелких частиц позволило повысить вероятность их столкновения. Установлено, что более эффективная УЗ-коагуляция обеспечивает повышение степени инерционного улавливания для частиц размером 2,5 мкм на 6 % – от 89 до 95 %, для частиц размером 1,5 мкм на 7 % – от 85 до 92 %, а для частиц размером 0,5 мкм на 9 % – от 76 до 85 %.

Ключевые слова: ультразвук, газоочистка, коагуляция, агломерация, акустическое поле, фракционная эффективность, резонансный промежуток, вихревой поток

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №19-19-00121, <https://rscf.ru/project/19-19-00121/>.

Для цитирования: Повышение эффективности коагуляции в резонансных промежутках за счет формирования акустических течений / В.Н. Хмелев, В.А. Нестеров, А.В. Шалунов, С.А. Терентьев // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 8. – С. 112–124. DOI: 10.18799/24131830/2024/8/4395

UDC 534.29.66.084:534-13

DOI: 10.18799/24131830/2024/8/4395

Increasing the efficiency of coagulation in resonant gaps due to acoustic flow formation

V.N. Khmelev, V.A. Nesterov✉, A.V. Shalunov, S.A. Terentyev

Biysk Technological Institute (branch) of the Altay State Technical University, Biysk, Russian Federation

✉nva@bti.secna.ru

Abstract. Relevance. The urgent need to eliminate environmental pollution from industrial emissions of various solid particles. At the same time, maximum attention is paid to cleaning exhaust gases from particles of 2.5 microns in size or less. One of the most promising ways to increase the efficiency of existing gas purification equipment in capturing such particles is their coagulation by exposing the gas flow to high-intensity acoustic vibrations of ultrasonic frequency. However, at low concentrations, even at the maximum permissible sound pressure level, the coagulation efficiency of particles smaller than 2.5 microns is insufficient to increase the recovery rate of gas cleaning equipment. Therefore, there is an urgent need to find new ways to further improve the efficiency of ultrasonic coagulation of particles smaller than 2.5 μm . **Aim.** To determine the conditions for the formation of vortex flows in ultrasonic fields with the maximum ultrasonic influence in terms of sound pressure level. Conducting comparative studies of the coagulation of particles with a size of 2.5 microns with and without vortex flows. This will make it possible to determine the real values of increasing the efficiency of ultrasonic coagulation during turbulization of a gas-dispersed flow by acoustic flows in comparison with coagulation in a uniform ultrasonic field and without it. **Objects.** Coagulation of particles under the influence of homogeneous and inhomogeneous ultrasonic fields. **Methods.** Computer modeling of the formed ultrasonic field by the finite element method using harmonic acoustic analysis. The paper considers the experimental method for studying the process of combining particles under the influence of ultrasonic vibrations. To determine the characteristics of an aerosol during experimental studies, a TIPAS-1 meter based on the small-angle scattering method and the spectral transparency method was used. **Results.** The paper introduces the results of studies of coagulation of particles with a size of 2.5 microns or less in an ultrasonic field formed in resonant gaps by oscillating disk emitters. The authors proposed to increase the efficiency of coagulation in resonant gaps through the use of ultrasonic disk emitters capable of forming alternating zones of maximum and minimum amplitude oscillations in the resonant gaps. The creation of such zones ensured the formation of vortex-type acoustic flows capable of moving particles within the nodal regions of a standing wave and between them. The involvement of small particles in the formed flows made it possible to increase the probability of their collision. It was established that more effective ultrasonic coagulation provides an increase in the degree of inertial capture for particles of 2.5 microns in size by 6% – from 89 to 95%, for particles of 1.5 microns in size by 7% – from 85 to 92%, and for particles of 0.5 microns by 9% – from 76 to 85%.

Keywords: ultrasound, gas purification, coagulation, agglomeration, acoustic field, fractional efficiency, resonant gap, vortex flow

Acknowledgements: This study was carried out with a grant from the Russian Science Foundation. (project no. 19-19-00121), <https://rscf.ru/project/19-19-00121/>.

For citation: Khmelev V.N., Nesterov V.A., Shalunov A.V., Terentyev S.A. Increasing the efficiency of coagulation in resonant gaps due to acoustic flow formation. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 8, pp. 112–124. DOI: 10.18799/24131830/2024/8/4395

Введение

При добыче, переработке и сжигании георесурсов в атмосферу выбрасывается большое количество опасных загрязнений в виде пыли, сажи и твердых частиц различного происхождения. В связи с этим одной из глобальных проблем человечества является необходимость ликвидации загрязнений окружающей среды промышленными выбросами различных твердых частиц. При этом максимальное внимание уделяется очистке отходящих газов от частиц размером 2,5 мкм и менее, которые при малом массовом содержании обладают высокой счетной концентра-

цией (более 95 % от суммарной концентрации частиц в атмосфере) [1–4]. При этом частицы столь малого размера длительное время удерживаются в воздухе и легко проникают через альвеолы легких в кровь человека, вызывая опасные заболевания. Разработанное и применяемое в настоящее время газоочистное оборудование практически непригодно для очистки промышленных выбросов от частиц такого размера [5–8].

Одним из наиболее перспективных способов повышения эффективности существующего газоочистного оборудования при улавливании таких

частиц является воздействие на газовый поток с мелкими частицами высокоинтенсивными акустическими колебаниями ультразвуковой (УЗ) частоты. Такое воздействие вплоть до уровней звукового давления в 160...170 дБ (до разрушения укрупненных частиц) позволяет объединить мелкие частицы для их последующего удаления [9–12], эффективно решая проблему удаления частиц, имеющих размеры более 2,5 мкм. Однако, как показали результаты исследований различных авторов [9, 11, 13, 14] ультразвуковая коагуляция, обеспечивая значительное увеличение эффективности (до 99 %) при удалении частиц размером более 2,5 мкм, теряет свои преимущества при объединении частиц размером менее 2,5 мкм для их последующего удаления [13–15].

Проведенный различными авторами анализ механизмов УЗ-коагуляции (гидродинамического и ортокинетического) [16, 17] позволил установить, что эффект, достигаемый за счет явлений переноса импульса газовой фазы между частицами и за счет колебательных движений твердых частиц друг относительно друга, существенно снижается по следующим причинам:

- использование достаточно низкой частоты ультразвукового воздействия (менее 22 кГц) в равной степени вовлекает в колебательное движение все частицы размером менее 2,5 мкм, что не способствует их соударениям и объединению;
- отсутствие взаимодействия (соударений) между частицами при реализации режима стоячей волны приводит к удерживанию уже укрупненных частиц ультразвуковым полем в узловых областях и без наличия дополнительного потока газа не обеспечивается присоединение к ним новых мелких частиц.

По этим причинам низкая вероятность столкновения частиц, особенно при малых концентрациях (больших расстояниях между частицами), приводит к тому, что даже при максимально допустимом уровне звукового давления (до разрушения образовавшихся агломератов) повышение эффективности коагуляции частиц размером менее 2,5 мкм за счет ультразвуковых колебаний становится практически невозможным [18].

Существует настоятельная необходимость поиска новых путей дальнейшего повышения эффективности УЗ-коагуляции частиц размером менее 2,5 мкм.

Понимание реальных механизмов УЗ-коагуляции позволяет предположить, что при невозможности дальнейшего увеличения уровня звукового давления (величины прямого воздействия на частицы) повышение вероятности столкновения мелких частиц можно обеспечить за счет придания им дополнительных перемещений, способствующих их

столкновению и объединению. Обеспечить такое дополнительное воздействие на мелкие частицы в ультразвуковом поле можно только за счет использования вторичных эффектов, возникающих при определенных условиях формирования высокоинтенсивного ультразвукового воздействия.

Одним из таких вторичных интенсифицирующих эффектов является так называемый «ультразвуковой ветер». Однако при реализации ультразвукового воздействия в открытом пространстве или протяженном газоходу формируемое радиационное давление позволяет перемещать частицы только в одном направлении без существенного увеличения эффективности взаимодействия частиц между собой [19, 20].

По этой причине для увеличения эффективности взаимодействия мелких частиц в максимальном по уровню звукового давления ультразвуковом поле необходимо сформировать движение частиц в различных направлениях, чтобы осуществлялось их взаимное перемещение и взаимодействие.

Кроме того, для существенного увеличения эффективности объединения частиц, особенно при их малой концентрации, необходимо обеспечивать повышение концентрации частиц в определенных областях путем их перемещения [9, 11, 13, 21] за счет формирования потоков вихревого характера, поскольку только вихревые потоки позволят увеличить эффективность взаимодействия (объединения) частиц за счет действия следующих факторов:

- увеличения скорости взаимного перемещения частиц различных размеров;
- увеличения времени взаимодействия частиц за счет их удержания в вихревых областях;
- формирования зон с повышенной концентрацией частиц.

Поэтому представленные далее исследования направлены на выявление условий формирования вихревых потоков в ультразвуковых полях с максимальным по уровню звукового давления УЗ-воздействием. Проведение сравнительных исследований процесса коагуляции частиц с размером 2,5 мкм при наличии вихревых потоков и без них позволит определить реальные значения повышения эффективности УЗ-коагуляции при турбулизации газодисперсного потока акустическими течениями в сравнении с коагуляцией в равномерном УЗ-поле и без него.

Экспериментальная установка

Описание стенда для исследования коагуляции высокодисперсных частиц

Для изучения процесса коагуляции частиц с размером 2,5 мкм и проведения сравнительных исследований при наличии вихревых потоков и без них был использован стенд на базе газоочисти-

тельного оборудования, реализующего УЗ коагуляцию и последующее улавливание укрупненных частиц.

Стенд состоит из коагуляционной камеры (рис. 1) и последовательно установленного циклона, основанного на конструкции ВНИИОГАЗ ЦН-15 с производительностью 10 м³/час. Отводной патрубок циклона соединен с вентустановкой.

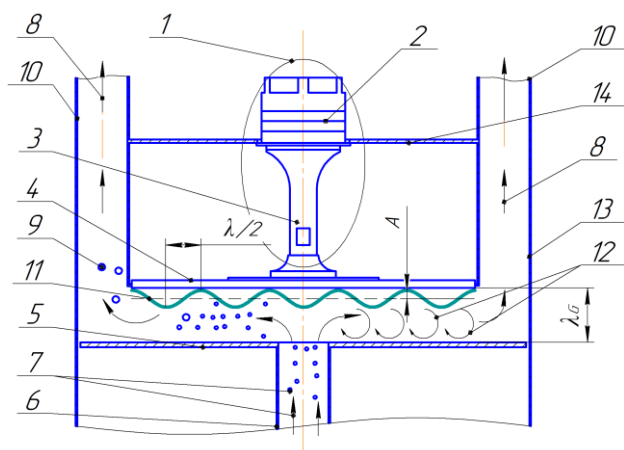


Рис. 1. Схема УЗ коагуляционной камеры: 1 – УЗ колебательная система (УЗКС); 2 – пьезопреобразователь; 3 – концентратор; 4 – дисковый излучатель; 5 – отражатель; 6 – входной патрубок; 7 – загрязненный газ; 8 – отходящий газодисперсный поток (к циклону); 9 – объединенные частицы; 10 – выходные патрубки; 11 – распределение амплитуд; 12 – вихревые течения; 13 – корпус; 14 – фланец излучателя; λ – длина волн изгибных колебаний; λ_G – расстояние между излучателем и отражателем

Fig. 1. Schematic diagram of the ultrasonic agglomeration chamber: 1 – ultrasonic vibrating system; 2 – piezoelectric transducer; 3 – concentrator; 4 – disk radiator; 5 – reflector; 6 – inlet tube; 7 – polluted gas; 8 – outgoing gas-dispersion flow (to cyclone); 9 – aggregated particles; 10 – outlet tubes; 11 – amplitude distribution; 12 – vortex flows; 13 – housing; 14 – radiator flange; λ – flexural vibration wavelength; λ_G – distance between radiator and reflector

Разработанная и изготовленная коагуляционная камера стенда (Патент РФ № 2759506) пригодна для реализации разнообразных условий и режимов воздействия высокоинтенсивными УЗ-колебаниями за счет использования различных типов ультразвуковых излучателей, а также за счет возможности резонансного усиления колебаний путем изменения расстояния между излучателем и отражателем [21].

В качестве источника УЗ-воздействия в коагуляционной камере использованы две УЗКС – 1 с дисковыми излучателями – 4 двух различных типов, создающие неравномерное или равномерное

распределение колебаний для УЗ воздействия с формированием потоков и без них. Напротив дискового излучателя установлен отражатель – 5 с размещенным по центру входным патрубком – 6.

Процесс объединения частиц в коагуляционной камере осуществляется следующим образом. Газовый поток поступает в патрубок – 6, установленный в центре отражателя – 5. После этого газодисперсный поток равномерно распространяется от центральной области к периферии. В процессе распространения на поток воздействуют УЗ-колебания, которые формируются между поверхностями излучателя – 4 и отражателя – 5. Выведение потока – 8 газа и укрупненных частиц – 9 осуществляется через патрубки – 10.

Конструкция коагуляционной камеры позволяет позиционировать по высоте отражатель для точной настройки резонансного режима (режима стоячей волны в газовой среде). Когда расстояние между излучателем и отражателем обеспечивает формирование стоячей волны, происходит увеличение эффективности воздействия за счет повышения уровня звукового давления.

Стенд для проведения исследований был укомплектован измерительным и вспомогательным оборудованием. Для измерения основного параметра – уровня звукового давления – был использован шумомер Экофизика-110А. Для измерения параметров формируемых частиц был использован измеритель дисперсных характеристик аэрозоля ТИПАС-1, который состоит из двух блоков:

- 1) реализует оптический метод малоуглового рассеивания (передатчик, приемник) и предназначен для измерения размеров частиц микронного аэрозоля и концентрации в диапазоне 1–100 мкм и 0,009–8,0 г/м³;
- 2) реализует оптический метод спектральной прозрачности (передатчик и приемник) и предназначен для измерения размеров частиц субмикронного аэрозоля и концентрации в диапазоне 0,1–2 мкм и 0,009–8,0 г/м³.

Отбор проб осуществлялся на входном патрубке коагуляционной камеры и на выходном патрубке циклона. Подача дисперсных частиц осуществлялась пневматическим распылителем эжекционного типа, установленным перед входным патрубком коагуляционной камеры.

Для определения траекторий движения частиц в камере установлен лазерный построитель плоскости. Лазерная плоскость проходит через ось симметрии излучателя. Фотокамера сфокусирована на лазерную плоскость и позволяет производить видеосъемку движения частиц между излучателем и отражателем. Направления потоков газа определяются косвенно, по траекториям светорассеивающих (траксирующих) частиц.

Ультразвуковые излучатели

Для проведения исследований были использованы два УЗ-излучателя, состоящие из пьезоэлектрического преобразователя Ланжевена и изгибно-колеблющегося излучателя в форме диска. При этом за счет возбуждения колебаний на неосновной моде на фронтальной поверхности излучателя формируются максимумы и минимумы колебаний, чередующиеся последовательно на расстоянии друг от друга, соответствующем половине длины волны изгибных колебаний в материале излучателя [14, 18, 22].

Для формирования неоднородного ультразвукового поля и воздействия им на газодисперсный поток был использован изгибно-колеблющийся дисковый излучатель с плоской фронтальной поверхностью (далее плоский излучатель). В свою очередь, для создания однородного УЗ-поля был использован излучатель, на фронтальной поверхности которого выполнены фазовыравнивающие кольцевые выступы с высотой, равной половине длины волны в газе (далее ступенчатый излучатель).

На рис. 2 представлены схемы, поясняющие принцип работы использованных для проведения сравнительных исследований двух типов дисковых излучателей.

Применяемые для исследований излучатели были изготовлены с равными по размерам поверхностями излучения и с максимально близкими рабочими частотами.

Как видно из рис. 2, А, соседние кольцевые области диска формируют равноамплитудные колебания в противофазе. Такой излучатель позволяет создавать неоднородное ультразвуковое поле, в котором возможно формирование вихревых тече-

ний между областями, колеблющимися в противофазе. В таком варианте исполнения излучателя характерные размеры создаваемых вихрей будут определяться длиной волны УЗ-колебаний в газовой среде, а их количество – числом соседних участков УЗ-поля, колеблющихся в противофазе, и расстоянием между излучателем и отражателем [14, 21, 22].

Для обеспечения синфазности (формирования однородного УЗ-поля) излучаемых колебаний в газовую среду с каждого кольцевого участка профиль фронтальной поверхности этого типа излучателей (рис. 2, Б) выполнен ступенчато-переменным. Местоположение и размеры выступов на фронтальной поверхности определяют основные характеристики УЗ-поля, формируемого излучателем. Поэтому для создания равномерного УЗ-поля ступенчатые переходы выполняются в зонах узловых окружностей с высотой равной половине длины волны УЗ-колебаний в газовой среде. Таким образом обеспечивается формирование равномерного ультразвукового поля как при наличии, так и при отсутствии отражателя, установленного на резонансном расстоянии от колеблющейся поверхности излучателя.

На рис. 3 представлены распределения колебаний и фотографии изготовленных излучателей двух типов.

Каждый пьезопреобразователь, соединенный с излучателем, снабжен электронным генератором для его питания, который обеспечивает поддержание постоянной амплитуды колебаний. Технические характеристики УЗ-излучателей представлены в табл. 1.

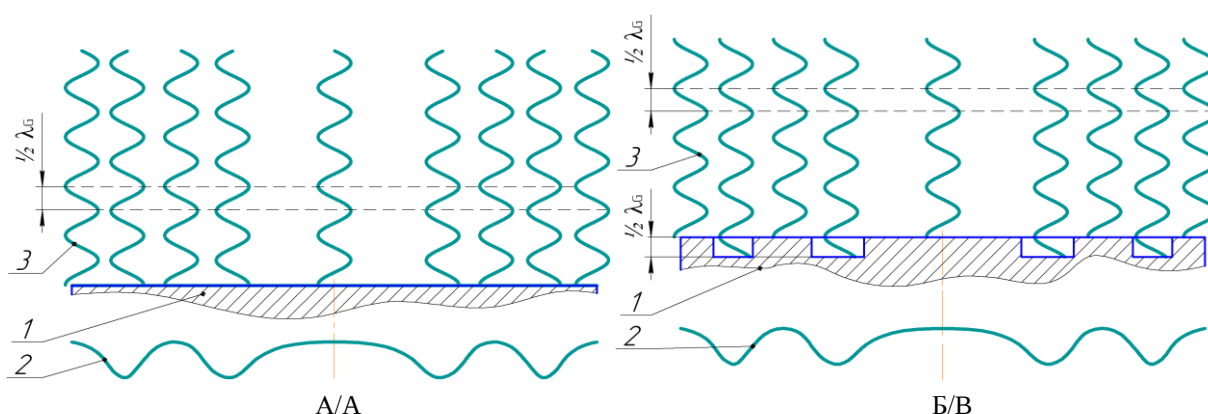


Рис. 2. Схемы формирования УЗ-излучения с помощью изгибно-колеблющихся ультразвуковых дисковых излучателей: А) излучатель с плоской фронтальной поверхностью (плоский); Б) излучатель с фазовыравнивающими кольцевыми выступами (ступенчатый); 1 – излучатель; 2 – распределение амплитуд колебаний; 3 – колебания, излучаемые в газовую среду; λ_g – длина волны в газовой среде

Fig. 2. Diagrams of generation of ultrasonic radiation using bending and oscillating ultrasonic disk radiators: А) radiator with a flat frontal surface (flat radiator); Б) radiator with phase-aligning collars (step-function radiator); 1 – radiator; 2 – vibration amplitudes distribution; 3 – vibrations emitted into a gaseous medium; λ_g – wavelength in a gaseous medium

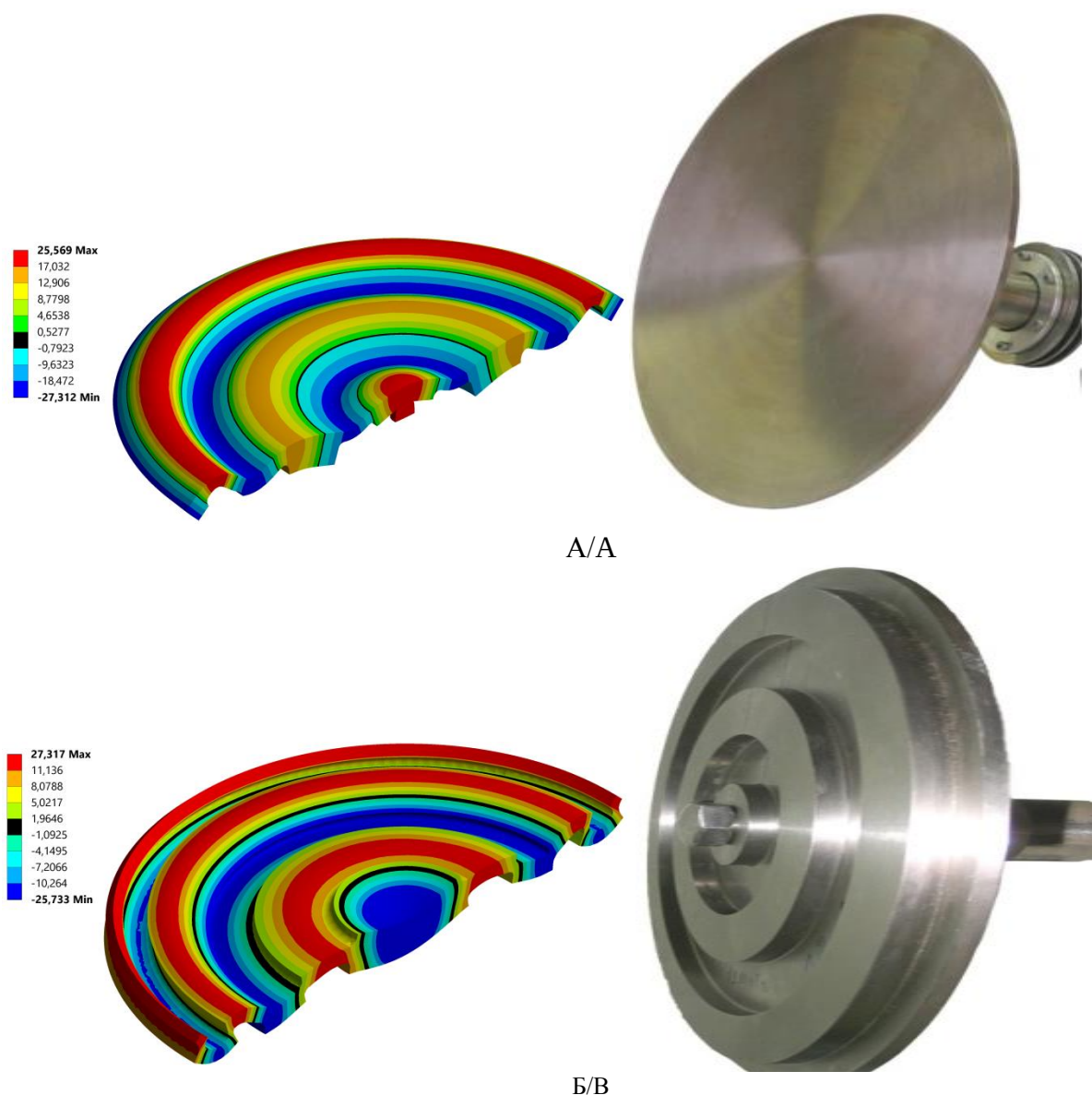


Рис. 3. Форма колебаний и фото ультразвуковых дисковых излучателей: А) плоский излучатель; Б) ступенчатый излучатель
Fig. 3. Shape of vibrations and photo of ultrasonic disk radiators: (A) flat emitter; (B) step-function radiator

Таблица 1. Технические характеристики ультразвуковых излучателей

Table 1. Technical characteristics of ultrasonic emitters

Тип дискового излучателя Disk transducer type	Плоский излучатель Flat emitter	Ступенчатый излучатель Step-function radiator
Диаметр излучателя, мм Radiator diameter, mm	Ø320	Ø320
Потребляемая мощность, Вт Power consumption, W	245	240
Частота колебаний, кГц Oscillation frequency, kHz	22,1	22,2
Амплитуда колебаний поверхности мах/мин, мкм Surface oscillation amplitude max/min, μm	51/45	51/47

Расчет распределения звукового давления в коагуляционной камере

Расчет параметров ультразвукового поля был проведен с целью определения условий максимально эффективного воздействия и сравнительного анализа распределений уровня звукового давления, создаваемого с помощью разных излучателей, при условии обеспечения расстояния от излучателя до отражателя (для каждого типа излучателя – плоского и ступенчатого), при котором формируется стоячая волна.

Моделирование распределения колебаний было проведено посредством конечно-элементного анализа с использованием модуля гармонического акустического анализа Harmonic Acoustics. При

моделировании были установлены граничные условия на основе полученных экспериментальных данных о параметрах разработанных и изготовленных УЗ-излучателей (частота колебаний и распределение амплитуд колебаний излучающей поверхности). Поверхности внутренних стенок камеры заданы как отражающие границы с определенным уровнем поглощения. Путем сравнения результатов моделирования со значениями уровня звукового давления, измеренными экспериментально, определен уровень поглощения УЗ-колебаний стенками коагуляционной камеры, который составил 11 %. Это значение принято в дальнейших расчетах.

Анализ распределения звукового давления

Распределения уровня звукового давления для обоих излучателей представлены на рис. 4.

Представленные результаты свидетельствуют о наличии уровня звукового давления в объеме камеры коагуляции между излучателем и отражателем (160–172 дБ) достаточного для коагуляции с максимальной эффективностью. Также определено расстояние (длина волны $\lambda_G=15$ мм), при котором

обеспечивается максимальный уровень звукового давления.

Установлено, что уровень звукового давления между отражателем и излучателем при использовании излучателя с фазовыравнивающими кольцевыми выступами составляет 168–171 дБ, при этом формируется равномерное УЗ-поле, а при использовании плоского излучателя – 168–172 дБ, формируемое поле неоднородное, ярко выражены области минимального уровня звукового давления, которые расположены вблизи нулей колебаний дискового излучателя.

Анализ траекторий движения частиц

На первом этапе был проведен анализ траекторий движения частиц в коагуляционной камере с помощью разработанного стенда. Траектории частиц определялись на основании кадрового отслеживания трассирующих частиц, снятых с помощью фотоаппарата. Выходная мощность генератора была установлена таким образом, чтобы уровень звукового давления при использовании обоих типов дисков был не менее 165 дБ. Полученные кадры съемки показаны на рис. 5.

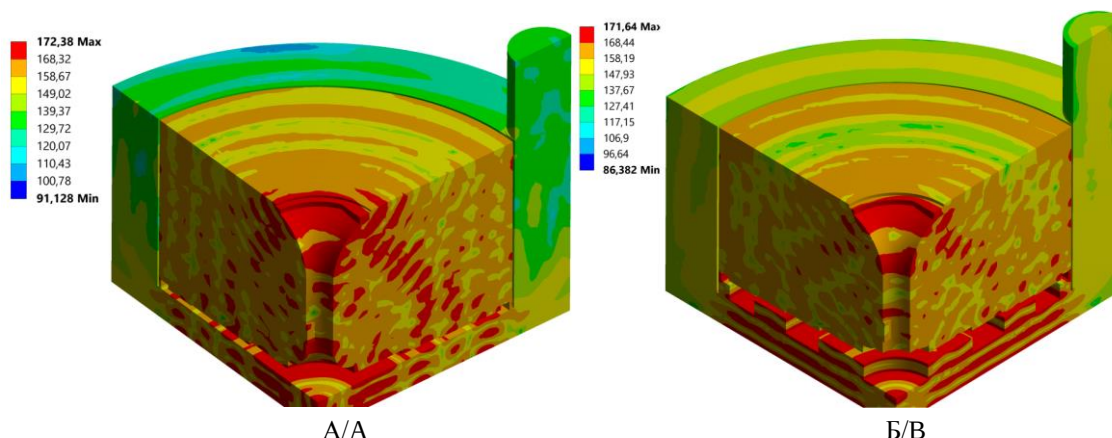


Рис. 4. Распределения уровня звукового давления внутри коагуляционной камеры: А) плоский излучатель; Б) ступенчатый излучатель

Fig. 4. Sound pressure level distribution inside the agglomeration chamber: A) flat emitter; B) step-function radiator

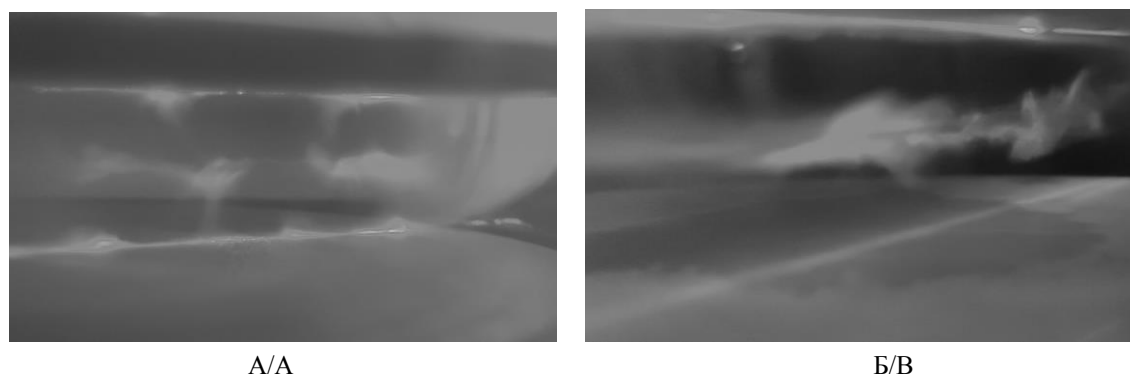


Рис. 5. Распределение частиц в коагуляционной камере: А) плоский излучатель; Б) ступенчатый излучатель

Fig. 5. Particle distribution in the agglomeration chamber: A) flat emitter; B) step-function radiator

На основе анализа полученных данных о траекториях движения частиц были построены схемы перемещения частиц в коагуляционной камере при использовании обоих типов излучателей (рис. 6, 7).

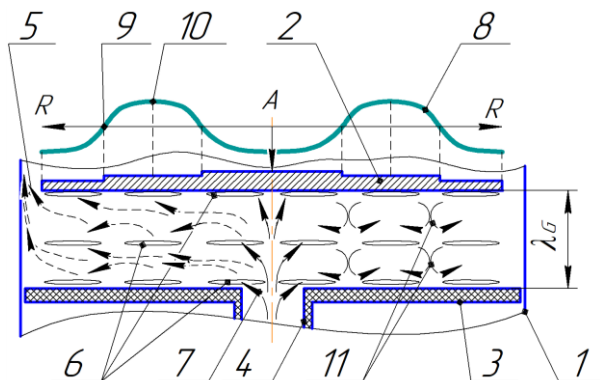


Рис. 6. Схема перемещения частиц в коагуляционной камере при использовании плоского излучателя: 1 – корпус камеры; 2 – излучатель; 3 – отражатель; 4 – входной патрубок; 5 – кольцевая область для выхода озвученного газодисперсного потока; 6 – области формирования агломератов; 7 – газодисперсный поток; 8 – распределение амплитуд колебаний дискового излучателя; 9 – нули колебаний излучателя; 10 – области максимальных амплитуд колебаний; 11 – вихревые области; λ_g – длина волны в газовой среде

Fig. 6. Diagram of particle paths in the agglomeration chamber when using a flat radiator: 1 – chamber body; 2 – radiator; 3 – reflector; 4 – inlet tube; 5 – annular domain for emission of the sounded gas-disperse flow; 6 – areas of agglomerates formation; 7 – gas-dispersion flow; 8 – distribution of amplitudes of vibrations of the disk radiator; 9 – zeros of vibrations of the radiator; 10 – areas of maximum vibration amplitudes; 11 – vortex areas; λ_g – wavelength in a gaseous medium

При использовании плоского излучателя (при расстояниях 7,5 и 15 мм) формируется стоячая волна с двумя и тремя узловыми плоскостями колебательной скорости, соответственно, в которые перемещаются, коагулируют и удерживаются твердые частицы. При этом возникают интенсивные вихревые течения, образуемые за счет смежно-расположенных колеблющихся в противофазе областей УЗ-поля. В результате чего частицы включаются в вихревое движение как в пределах одной узловой области, так и между ними через зоны низкого уровня звукового давления, расположенные вблизи (напротив) нулей колебаний дискового излучателя. При этом помимо коагуляции частиц в узловых областях колебательной скорости происходит их дополнительное взаимное вихревое перемещение и взаимодействие между собой, что дополнительно приводит к увеличению эффективности коагуляции.

Изменение расстояния в большую или меньшую сторону относительно резонансного расстояния приводит к возникновению бегущей волны и исчезновению узловых областей. При этом вихревые потоки практически не формируются, снижая эффективность коагуляции. Также установлено, что при расстоянии, равном λ , интенсивность вихревых течений выше, чем при расстоянии, равном $\lambda_g/2$. При расстояниях, равных $1/4 \lambda_g$ и $3/4 \lambda_g$, наступают условия, при которых уровень звукового давления достигает своего минимального значения.

Для сравнения на рис. 7 приведена схема движения потоков для излучателя, формирующего равномерное УЗ-поле.

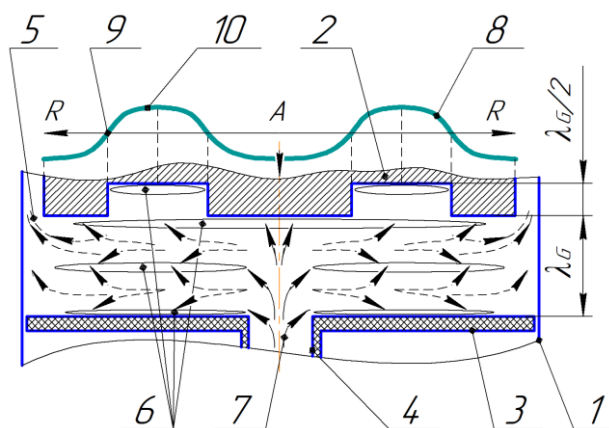


Рис. 7. Схема перемещения частиц в коагуляционной камере при использовании ступенчатого излучателя: 1 – корпус камеры; 2 – излучатель; 3 – отражатель; 4 – входной патрубок; 5 – кольцевая область для выхода озвученного газодисперсного потока; 6 – области формирования агломератов; 7 – газодисперсный поток; 8 – распределение амплитуд колебаний дискового излучателя; 9 – нули колебаний излучателя; 10 – области максимальных амплитуд колебаний; λ_g – длина волны в газовой среде

Fig. 7. Diagram of particle paths in the agglomeration chamber when using a step-function radiator: 1 – chamber body; 2 – radiator; 3 – reflector; 4 – inlet tube; 5 – annular domain for emission of the sounded gas-disperse flow; 6 – areas of agglomerates formation; 7 – gas-dispersion flow; 8 – distribution of amplitudes of vibrations of the disk radiator; 9 – zeros of vibrations of the radiator; 10 – areas of maximum vibration amplitudes; λ_g – wavelength in a gaseous medium

Как и в предыдущем случае, при использовании ступенчатого излучателя при расстоянии между излучателем и отражателем 7,5 мм, а также при расстоянии 15 мм формируется стоячая волна с двумя и тремя узловыми плоскостями колебательной скорости, соответственно, в которые перемещаются, коагулируют и удерживаются твердые частицы.

Дальнейшая коагуляция частиц не происходит из-за удерживания уже сформированных частиц в узлах стоячей волны. При этом не происходит взаимного перемещения частиц в пределах узловой зоны без наличия какого-либо дополнительного принудительного потока газа. Продолжительная подача аэрозоля приводит к дополнительному увеличению размеров частиц, удерживаемых ультразвуковым полем в узловых областях. При этом наличие вихревых потоков не обнаруживается.

Определение эффективности улавливания частиц от параметров газодисперсного потока и ультразвукового воздействия

Для выявления возможности повышения эффективности улавливания с помощью разработанного стенда были проведены экспериментальные исследования, позволившие определить влияние различных факторов (расход газодисперсного потока, уровень звукового давления, массовая концентрация) на эффективность улавливания дисперсных частиц, а также определить фракционную эффективность.

Для того чтобы определить вклад в процесс коагуляции частиц эффектов, возникающих при ультразвуковом воздействии, и исключить другие факторы, влияющие на эффективность (например, электризация частиц), был проведен сравнительный анализ данных, полученных при наличии УЗ-воздействия (как однородным, так и неоднородным полем) и без УЗ-воздействия. Без УЗ-воздействия все гидродинамические параметры течения газодисперсного потока были неизменными, поэтому эффекты, связанные с электризацией в равной степени учитываются и влияют на коагуляцию частиц как в отсутствие ультразвука, так и при его наличии. Такая постановка задачи позволяет однозначно установить взаимосвязь между ультразвуковым воздействием и повышением эффективности коагуляции.

Эффективность коагуляции считалась прямо пропорциональной эффективности улавливания частиц в циклоне. При этом эффективность улавливания рассчитывалась с помощью выражения (1):

$$\eta = \left(1 - \frac{N_{outlet}}{N_{inlet}}\right) \cdot 100\%, \quad (1)$$

где N_{outlet} – концентрация частиц на выходе из циклона, г/м³; N_{inlet} – концентрация частиц на входе в коагуляционную камеру, г/м³.

Определение оптимального расхода газа

На следующем этапе был определен расход газодисперсного потока, при котором обеспечивается максимальная эффективность улавливания частиц, как при наличии, так и при отсутствии акустического воздействия. Исследования проводились при следующих условиях: уровень звукового давления составлял 165 дБ;

начальная массовая концентрация $N_{inlet}=2 \cdot 10^{-2}$ г/м³. Расход газа изменялся в пределах от 2,5 до 10 м³/ч. В качестве дисперсного материала при проведении исследований был использован микротальк Jetfine T1 СА с диаметром частиц $d_{50}=1$ мкм, $d_{95}=3$ мкм.

На рис. 8 представлены зависимости эффективности улавливания частиц от расхода газа.

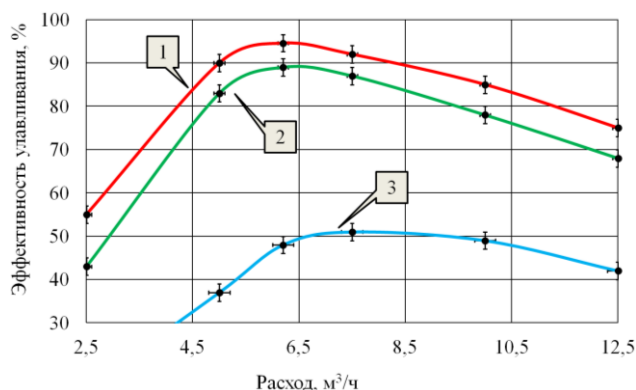


Рис. 8. Зависимости эффективности улавливания частиц от расхода газа: 1 – плоский излучатель; 2 – ступенчатый излучатель; 3 – без УЗ-воздействия

Fig. 8. Dependences of particle capture efficiency on gas flow rate: 1 – flat radiator; 2 – step-function radiator; 3 – without ultrasonic influence

Полученные зависимости позволяют сделать вывод, что оптимальный расход газа, при котором обеспечивается максимальная эффективность улавливания частиц, составляет 6,2 м³/ч при использовании плоского и ступенчатого дисковых излучателей. Однако без УЗ-воздействия оптимальный расход составил 8–10 м³/ч, что соответствует оптимальному расходу потока для циклона. Дальнейшие исследования проводились с оптимальным расходом 6,2 м³/ч.

Это свидетельствует о том, что эффективность коагуляции частиц оказывает большее влияние на эффективность улавливания, чем установление оптимального расхода газа.

Таким образом, эффективность коагуляции частиц под воздействием УЗ колебаний зависит от расхода газа (от времени УЗ-воздействия). При этом очевидно, что чем больше время УЗ-воздействия, тем выше эффективность коагуляции.

Влияние уровня звукового давления на эффективность улавливания частиц

Для определения влияния уровня звукового давления на эффективность улавливания были проведены отдельные экспериментальные исследования при концентрации $N_{inlet}=2 \cdot 10^{-2}$ г/м³. На рис. 9 представлены полученные зависимости.

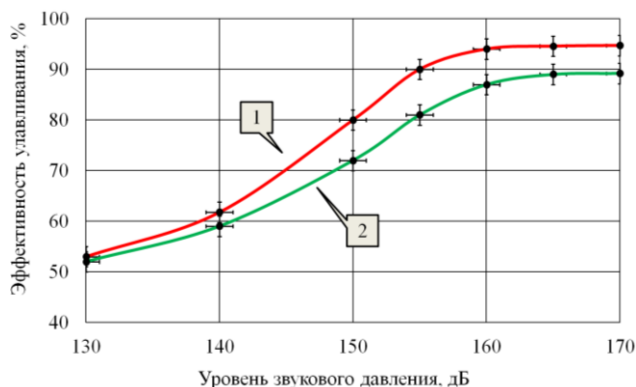


Рис. 9. Зависимость эффективности улавливания от уровня звукового давления: 1 – плоский излучатель; 2 – ступенчатый излучатель

Fig. 9. Dependence of the capture efficiency on the sound pressure level: 1 – flat radiator; 2 – step-function radiator

Анализ полученных зависимостей позволяет сделать вывод, что при начальном уровне звукового давления $L=130$ дБ эффективность улавливания практически не зависит от типа используемого излучателя, прирост эффективности за счет вихревых течений практически отсутствует, что свидетельствует об их недостаточном развитии и влиянии.

При увеличении уровня звукового давления наблюдается повышение эффективности улавливания частиц. При этом увеличение эффективности при воздействии неоднородным полем оказывается более значительным. Это связано с интенсификацией вихревых течений при увеличении уровня звукового давления.

Рост эффективности улавливания продолжается до достижения уровнем звукового давления значений 165 дБ, при этом для ступенчатого излучателя эффективность составляет менее 90 %. В свою очередь, формируемые плоским излучателем вихревые акустические потоки при уровне звукового давления 165 дБ позволяют увеличить эффективность улавливания на 6 %.

Известно, что при воздействии газовых потоков или в неоднородном УЗ-поле крупные агломераты начинают распадаться вследствие воздействия акустических потоков. Поэтому дальнейшего роста эффективности не наблюдается, что свидетельствует о начале разрушения агломератов, их разрушение происходит одновременно с коагуляцией.

Влияние массовой концентрации на эффективность улавливания частиц

Для определения влияния массовой концентрации частиц на эффективность улавливания были проведены экспериментальные исследования при уровне звукового давления 165 дБ, по результатам которых получены зависимости (рис. 10).

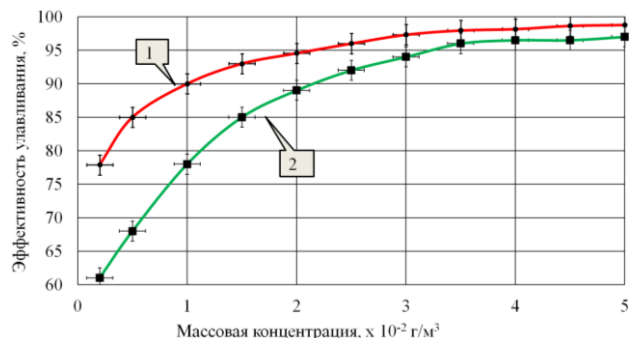


Рис. 10. Зависимость эффективности улавливания от массовой концентрации частиц: 1 – плоский излучатель; 2 – ступенчатый излучатель

Fig. 10. Dependence of capture efficiency on particle mass concentration: 1 – flat radiator; 2 – step-function radiator

Как следует из представленных зависимостей, при концентрациях до $N_{inlet}=2 \cdot 10^{-2}$ г/м³ происходит значительный рост эффективности улавливания частиц. При этом эффективность улавливания выше при использовании плоского излучателя вследствие повышенной эффективности коагуляции частиц. При концентрации $N_{inlet}=3 \cdot 10^{-2}$ г/м³ и выше рост эффективности замедляется, а при концентрации выше $N_{inlet}=4 \cdot 10^{-2}$ г/м³ эффективности улавливания становятся практически одинаковыми с использованием обоих типов излучателей. Это происходит, поскольку при указанных концентрациях расстояния между частицами оказываются достаточными для реализации механизмов ортокинетического и гидродинамического механизмов коагуляции частиц, и влияние вихревых потоков слабо сказывается на повышении вероятности столкновения частиц.

Определение фракционной эффективности

Для подтверждения эффективности улавливания частиц различных размеров были проведены экспериментальные исследования с использованием смеси микротальков различных марок (Jetfine T1 CA $d_{50}=1$ мкм, Luzenac St30 $d_{50}=6$ мкм, Luzenac H50 $d_{50}=9$ мкм), имеющей полидисперсный состав. Сравнительные эксперименты проведены при начальной концентрации частиц $N_{inlet}=0,2 \cdot 10^{-2}$ г/м³ при трех различных вариантах работы коагуляционной камеры: воздействие плоским излучателем; воздействие ступенчатым излучателем; без ультразвукового воздействия. В результате получены данные о фракционной эффективности, показанные на рис. 11.

Анализ полученных зависимостей показывает, что:

- эффективность улавливания частиц без ультразвукового воздействия (рис. 11, кривая 3) существенно ниже, чем при его наличии;

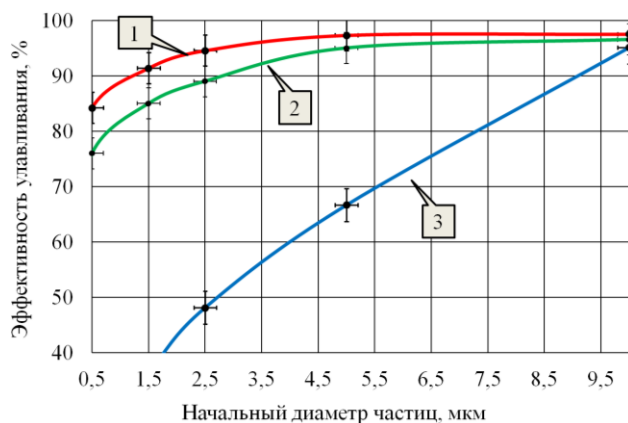


Рис. 11. Фракционная эффективность: 1 – плоский излучатель; 2 – ступенчатый излучатель; 3 – без УЗ-воздействия

Fig. 11. Fractional efficiency: 1 – flat radiator; 2 – step-function radiator; 3 – without ultrasonic influence

- с использованием ступенчатого излучателя (рис. 11, кривая 2) при формировании стоячей волны частицы почти не взаимодействуют между собой в пределах узловой области, а при очень низкой концентрации эффективность агломерации сводится к нулю;
- применение плоского излучателя (рис. 11, кривая 1) позволяет формировать вихревые течения между смежно-расположенными областями, колеблющимися в противофазе, что существенно повышает взаимодействие частиц, расположенных в узловых зонах.

Таким образом, результаты экспериментальных исследований подтвердили, что повышение эффективности УЗ-коагуляции возможно за счет создания акустических течений в виде вихревых потоков. При этом эффективность улавливания частиц размером 2,5 мкм возрастает на 6 % – от 89 до 95 %, частиц размером 1,5 мкм на 7 % – от 85 до 92 %, а частиц размером 0,5 мкм на 9 % – от 76 до 85 %.

Заключение

В ходе выполнения работы были проведены теоретические и экспериментальные исследования процесса коагуляции частиц размером 2,5 мкм и менее в ультразвуковом поле, формируемом в резонансных промежутках колеблющимися дисковыми излучателями. Представлены результаты исследований коагуляции частиц размером 2,5 мкм и менее в равномерном поле УЗ-колебаний, и показана невозможность реализации процесса с эффективностью для частиц размером менее 2,5 мкм.

Предложено новое направление повышения эффективности коагуляции за счет применения ультразвуковых дисковых излучателей, способных формировать в резонансных промежутках чередующиеся зоны, колеблющиеся в противофазе. Создание и применение таких излучателей обеспечило формирование акустических течений вихревого типа, способных перемещать частицы в пределах узловых областей стоячей волны и между ними, что увеличило вероятность их столкновения.

Проведенные исследования и полученные экспериментальные результаты позволили выявить условия и режимы повышения эффективности УЗ-коагуляции за счет формирования акустических течений, способных перемещать частицы в пределах узловых областей стоячей волны и между ними. Показано, что более эффективная УЗ-коагуляция обеспечивает повышение степени инерционного улавливания для частиц размером 2,5 мкм на 6 % – от 89 до 95 %, для частиц размером 1,5 мкм на 7 % – от 85 до 92 %, а для частиц размером 0,5 мкм на 9 % – от 76 до 85 %.

Дальнейшее повышение эффективности коагуляции и улавливания дисперсных частиц может быть обеспечено за счет комплексного воздействия на газодисперсные системы полями различной физической природы (например, ультразвуковыми совместно с электростатическими). Реализация комплексного воздействия входит в планы развития предложенного подхода коагуляции аэрозолей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Particulate air pollution acute cardio respiratory hospital admissions and mortality among the elderly / J. Halonen, T. Lanki, T. Yli-Tuomi, P. Tiittanen, V. Kulmala, J. Pekkanen // American Journal of Epidemiology. – 2009. – Vol. 20. – № 1. – P. 143–153.
2. Progress of air pollution control in China and its challenges and opportunities in the ecological civilization era / X. Lu, S. Zhang, J. Xing, Y. Wang, W. Chen, D. Ding, J. Hao // Engineering. – 2020. – Vol. 6. – № 12. – P. 1423–1431.
3. Miller L., Xu X. Ambient PM2.5 human health effects – findings in China and research directions // Atmosphere. – 2018. – Vol. 9. – № 424. – P. 1–16.
4. Mortality risk and PM 2.5 air pollution in the USA: an analysis of a national prospective cohort / C.A. Pope, M. Ezzati, J.B. Cannon, R.T. Allen, M. Jerrett, R.T. Burnett // Air Quality, Atmosphere & Health. – 2017. – Vol. 11. – № 3. – P. 245–252.
5. Wang L. Theoretical study of cyclone design. Diss. – Texas, 2004. – 137 p.
6. Пицуха Е. А., Теплицкий Ю. С., Жукова Ю.В. Исследование течений в циклонной камере. // Инженерно-физический журнал. – 2011. – Т. 84. – № 4. – С. 813–819.
7. Пицуха Е.А., Теплицкий Ю.С., Бородуля В.А. Унос частиц из циклонной камеры // Инженерно-физический журнал. – 2012. – Т. 85. – № 6. – С. 1196–1201.
8. Hoekstra A.J. Gas flow field and collection efficiency of cyclone separators. Diss. – Stevinweg, 2000. – 165 p.

9. Ultrasonic agglomeration and preconditioning of aerosol particles for environmental and other applications / E. Riera, I. González-Gómez, G. Rodríguez, J.A., Gallego-Juárez // *Power Ultrasonics* / Eds. J.A. Gallego-Juárez, K.F. Graff. – Oxford: Woodhead Publ., 2015. – P. 1023–1058.
10. Ультразвуковая коагуляция в скрубберах Вентури: особенности реализации и эффективность применения / В.Н. Хмелев, А.В. Шалунов, С.Н. Цыганок, В.А. Нестеров // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2020. – Т. 331. – № 5. – С. 128–139.
11. Experimental study on acoustic agglomeration of fine particles from coal combustion / H. Chen, W. Liu, J. Li, X. Xun, X. Shen // *Proceedings – 2010 International Conference on Digital Manufacturing and Automation. – ICDMA 2010*. – Vol. 1. – P. 702–705.
12. Numerical investigation of PM_{2.5} size enlargement by heterogeneous condensation for particulate abatement / F. Fan, S. Zhang, W. Wang, J. Yan, M. Su // *Process Safety and Environmental Protection*. – 2019. – Vol. 125. – P. 197–206.
13. Ng B.F., Xiong J.W., Wan M.P. Application of acoustic agglomeration to enhance air filtration efficiency in airconditioning and mechanical ventilation (ACMV) systems // *PLoS One*. – 2017. – Vol. 12. – № 6. – e0178851.
14. Power ultrasonic transducer with extensive radiator for industrial processing / J.A. Gallego-Juarez, G. Rodriguez, V. Acosta, E. Riera // *Ultrasonic Sonochemistry*. – 2010. – Vol. 17. – P. 954–964.
15. Sheng C., Shen X. Simulation of acoustic agglomeration processes of poly-disperse solid particles // *Aerosol Science and Technology*. – 2007. – Vol. 4. – № 1. – P. 1–13.
16. König W. Hydrodynamisch-akustische Untersuchungen. Über die Kräfte zwischen zwei Kugeln in einer schwingenden Flüssigkeit und über die Entstehung der Kundtschen Staubfiguren // *Ann. Phys. und Chem.* – 1891. – Vol. 42. – № 4. – P. 549.
17. Brandt O., Freund H., Hiedemann E. Zur Theorie der akustischen Koagulation // *Kolloid-Zeitschrift*. – 1936. – Vol. 77. – P. 103–115.
18. Разработка и исследование нового способа газоочистки от частиц размером менее 2,5 мкм / В.Н. Хмелев, А.В. Шалунов, А.С. Боченков, В.А. Нестеров // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2021. – Т. 332. – № 10. – С. 127–139.
19. Руденко О.В., Солуян С.И. Теоретические основы нелинейной акустики. – М.: Наука, 1975. – 287 с.
20. Yong S., Sangmo K. Acoustic Streaming // *Encyclopedia of Microfluidics and Nanofluidics*. – New York: Springer, 2014. – P. 25–33.
21. Способ ультразвуковой коагуляции: пат. Рос. Федерация №2759506; заявл. 12.02.2021; опубл. 15.11.2021, Бюл. № 32. – 9 с.
22. Khmelev V.N., Shalunov A.V., Nesterov V.A. Summation of high-frequency Langevin transducers vibrations for increasing of ultrasonic radiator power // *Ultrasonics*. – 2021. – Vol. 114. – 106413.

Информация об авторах

Владимир Николаевич Хмелев, доктор технических наук, заместитель директора по научной работе Бийского технологического института Алтайского государственного технического университета, Россия, 659305, г. Бийск, ул. Трофимова, 27. vnv@bti.secna.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7089-3578>

Виктор Александрович Нестеров, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник Бийского технологического института Алтайского государственного технического университета, Россия, 659305, г. Бийск, ул. Трофимова, 27. nva@bti.secna.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6140-5699>

Андрей Викторович Шалунов, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник Бийского технологического института Алтайского государственного технического университета, Россия, 659305, г. Бийск, ул. Трофимова, 27. shalunov@bti.secna.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5299-9931>

Сергей Александрович Терентьев, кандидат технических наук, старший научный сотрудник Бийского технологического института Алтайского государственного технического университета, Россия, 659305, г. Бийск, ул. Трофимова, 27. sergey@bti.secna.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6989-9769>

Поступила в редакцию: 15.09.2023

Поступила после рецензирования: 29.09.2023

Принята к публикации: 24.05.2024

REFERENCES

1. Halonen J., Lanki T., Yli-Tuomi T., Tiittanen P., Kulmala V., Pekkanen J. Particulate air pollution acute cardio respiratory hospital admissions and mortality among the elderly. *American Journal of Epidemiology*, 2009, vol. 20, no. 1, pp. 143–153.
2. Lu X., Zhang S., Xing J., Wang Y., Chen W., Ding D., Hao J. Progress of air pollution control in China and its challenges and opportunities in the ecological civilization era. *Engineering*, 2020, vol. 6, no. 12, pp. 1423–1431.
3. Miller L., Xu X. Ambient PM_{2.5} human health effects – findings in China and research directions. *Atmosphere*, 2018, vol. 9, no. 424, pp. 1–16.
4. Pope C.A., Ezzati M., Cannon J.B., Allen R.T., Jerrett M., Burnett R.T. Mortality risk and PM 2.5 air pollution in the USA: an analysis of a national prospective cohort. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 2017, vol. 11, no. 3, pp. 245–252.
5. Wang Lingjuan. *Theoretical study of cyclone design*. Diss. Texas, 2004. 137 p.
6. Pitsukha E.A., Teplitsky Yu.S., Zhukova Yu.V. Study of flows in a cyclone chamber. *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal*, 2011, vol. 84, no. 4, pp. 813–819. (In Russ.)
7. Pitsukha E. A., Teplitsky Yu. S., Borodulya V. A. Entrainment of particles from the cyclone chamber. *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal*, 2012, vol. 85, no. 6, pp. 1196–1201. (In Russ.)
8. Hoekstra A.J. *Gas flow field and collection efficiency of cyclone separators*. Diss. Stevinweg, 2000. 165 p.

9. Riera E., González-Gomez I., Rodriguez G., Gallego-Juarez J.A. Ultrasonic agglomeration and preconditioning of aerosol particles for environmental and other applications. *Power Ultrasonics*. Eds. J.A. Gallego-Juarez, K.F. Graff. Oxford, Woodhead Publ., 2015. pp. 1023–1058.
10. Khmelev V.N., Shalunov A.V., Tsyganok S.N., Nesterov V.A. Ultrasonic coagulation in venturi scrubbers: features of implementation and efficiency of application. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 5, pp. 128–139. (In Russ.)
11. Chen H., Liu W., Li J., Xun X., Shen X. Experimental study on acoustic agglomeration of fine particles from coal combustion. *Proceedings – 2010 International Conference on Digital Manufacturing and Automation, ICDMA, 2010*, vol. 1, pp. 702–705.
12. Fan F., Zhang S., Wang W., Yan J., Su M. Numerical investigation of PM2.5 size enlargement by heterogeneous condensation for particulate abatement. *Process Safety and Environmental Protection*, 2019, vol. 125, pp. 197–206.
13. Ng B.F., Xiong J.W., Wan M.P. Application of acoustic agglomeration to enhance air filtration efficiency in airconditioning and mechanical ventilation (ACMV) systems. *PLoS One*, 2017, vol. 12, no. 6, e0178851.
14. Gallego-Juarez J.A., Rodriguez G., Acosta V., Riera E. Power ultrasonic transducer with extensive radiator for industrial processing. *Ultrasonic Sonochemistry*, 2010, vol. 17, pp. 954–964.
15. Sheng C., Shen X. Simulation of acoustic agglomeration processes of poly-disperse solid particles. *Aerosol Science and Technology*, 2007, vol. 41, no. 1, pp. 1–13.
16. König. W. Hydrodynamic-acoustic investigations. On the forces between two spheres in a vibrating fluid and on the formation of Kundt's dust figures. *Ann. Phys. und Chem*, 1891, vol. 42, no. 4, pp. 549. (In Germ.)
17. Brandt O., Freund H., Hiedemann E. On the theory of acoustic coagulation. *Kolloid-Zeitschrift*, 1936, vol. 77, pp. 103–115. (In Germ.)
18. Khmelev V.N., Shalunov A.V., Bochenkov A.S., Nesterov V.A. Development and research of a new method of gas cleaning from particles smaller than 2.5 μm . *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 10, pp. 127–139. (In Russ.)
19. Rudenko O.V., Soluyan S.I. *Theoretical bases of nonlinear acoustics*. Moscow, Nauka Publ., 1975. 287 p. (In Russ.)
20. Yong S., Sangmo K. Acoustic streaming. *Encyclopedia of Microfluidics and Nanofluidics*. New York, Springer, 2014. pp. 25–33.
21. Bochenkov A.S., Golykh R.N., Nesterov V.A., Tertishnikov P.P., Khmelev V.N., Khmelev M.V., Tsyganok S.N., Shalunov A.V. *Ultrasonic coagulation method*. Patent RF, no. 2759506, 2021. (In Russ.)
22. Khmelev V.N., Shalunov A.V., Nesterov V.A. Summation of high-frequency Langevin transducers vibrations for increasing of ultrasonic radiator power. *Ultrasonics*, 2021, vol. 114, 106413.

Information about the authors

Vladimir N. Khmelev, Dr. Sc., Deputy Director of Research, Biysk Technological Institute (branch) of the Altay State Technical University, 27, Trofimov street, Biysk, 659305, Russian Federation. vnh@bti.secna.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7089-3578>

Viktor A. Nesterov, Cand. Sc., Leading Researcher, Biysk Technological Institute (branch) of the Altay State Technical University, 27, Trofimov street, Biysk, 659305, Russian Federation. nva@bti.secna.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6140-5699>

Andrey V. Shalunov, Dr. Sc., Leading Researcher, Biysk Technological Institute (branch) of the Altay State Technical University, 27, Trofimov street, Biysk, 659305, Russian Federation. shalunov@bti.secna.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5299-9931>

Sergey A. Terentyev, Cand. Sc., Senior Researcher, Biysk Technological Institute (branch) of the Altay State Technical University, 27, Trofimov street, Biysk, 659305, Russian Federation. sergey@bti.secna.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6989-9769>

Received: 15.09.2023

Revised: 29.09.2023

Accepted: 24.05.2024

УДК 550.47

DOI: 10.18799/24131830/2024/8/4602

Шифр специальности ВАК: 1.6.21

Дендрогеохимия Hg по данным изучения сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris*) на территории Томского района

Е.Е. Ляпина^{1✉}, Л.Т.Х. Шанг², М.Г. Крачнакова²,
Н.В. Барановская², А.Н. Маркелова¹, С.Ю. Золотов¹

¹ Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Россия, г. Томск

² Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск

✉ eeldv@mail.ru

Аннотация. **Актуальность** исследования обусловлена необходимостью эколого-геохимической оценки особенностей поступления ртути в древесину сосны для выявления факторов, определяющих аккумуляцию элемента древесиной. **Цель:** количественная оценка содержания ртути в годовых кольцах сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) на территории Томского района, а также выявление геоэкологических и климатических факторов, оказывающих влияние на аккумуляцию поллютанта. **Объект:** годовые кольца сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), широко используемые в мировых научных исследованиях для получения информации о загрязнении окружающей среды химическими элементами. **Методы:** отбор проб керна сосны, высушивание образцов при комнатной температуре. Определение количества, ширины годовых колец и прироста древесины на приборе LINTAB (программное обеспечение TSAP-Win и LIGNOVISION) в Институте мониторинга климатических и экологических систем СО РАН (г. Томск). Определение концентраций на ртутном анализаторе РА-915+ методом атомной абсорбции (метод пиролиза) на базе Инженерной школы природных ресурсов Томского политехнического университета. Расчёт эколого-геохимических показателей: коэффициент концентрации, временно допустимая концентрация, кларк ноосферы, нормирование по В. Markert, фактор обогащения. Оценка климатического отклика накопления ртути деревьями по среднесуточным данным по метеостанции г. Томск с 1933 по 2021 гг. **Результаты.** Получены данные о валовом содержании и геохимических особенностях накопления ртути древесиной сосны обыкновенной на территории Томского района. Результаты расчетов основных геоэкологических показателей ртутной нагрузки свидетельствуют о превышении концентраций элемента относительно фона, среднего для наземных растений, а также обогащены по результатам нормирования по скандию. Выделен период повышенной концентрации ртути в древесине сосны (1941–1974 гг.) вследствие влияния промышленности города. Выявлен похожий характер аккумуляции поллютанта в интервале 1970–1986 гг. на территории исследования с превышением в 1,6–1,8 раз относительно сопредельных сред (почва, твердый осадок снега, хвоя, мхи). На накопление ртути древесиной влияет сумма осадков, как за год, так и в течение вегетационного периода и в период с положительными температурами, а также продолжительность осадков в течение года и вегетационного периода.

Ключевые слова: ртуть, древесина, сосна, дендрогеохимия, Томский район, природно-техногенные экосистемы, геоэкологические и климатические факторы

Благодарности: Исследование проведено в рамках реализации гранта Российского научного фонда (проект № 20-64-47021) <https://rscf.ru/en/project/20-64-47021/>. Обработка данных выполнена в рамках бюджетного проекта ИМКЭС СО РАН (г. Томск).

Для цитирования: Дендрогеохимия Hg по данным изучения сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris*) на территории Томского района / Е.Е. Ляпина, Ле Тхи Хонг Шанг, М.Г. Крачнакова, Н.В. Барановская, А.Н. Маркелова, С.Ю. Золотов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 8. – С. 125–136. DOI: 10.18799/24131830/2024/8/4602

UDC 550.47

DOI: 10.18799/24131830/2024/8/4602

Dendrogeochemistry of Hg according to the study of Scots pine (*Pinus sylvestris*) in the Tomsk region

E.E. Lyapina^{1✉}, L.T.H. Shang², M.G. Krachnakova²,
N.V. Baranovskaya², A.N. Markelova¹, S.Yu. Zolotov¹

¹ Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, Tomsk, Russian Federation

² National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

✉ eeldv@mail.ru

Abstract. Relevance. The need for an ecological and geochemical assessment of the mercury intake characteristics into pine wood in order to identify the factors determining the accumulation of the element by trees. **Aim.** Quantitative evaluation of mercury content in the annual rings of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) in the Tomsk region, as well as identification of geoecological and climatic factors affecting the accumulation of pollutant. **Object.** Annual rings of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) widely used in world science to obtain information about environmental pollution by chemical elements. **Methods.** Pine core sampling, samples drying at room temperature. Determination of the number, width of annual rings and growth of wood on the LINTAB device (TSAP-Win and LIGNOVISION software) at the Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS (Tomsk). Determination of concentrations on the mercury analyzer RA-915+, by atomic absorption (pyrolysis method) on the basis of the Engineering School of Natural Resources of Tomsk Polytechnic University. Calculation of ecological and geochemical indicators: concentration coefficient, temporal allowable concentration, noosphere clark, normalization according to B. Markert, enrichment factor. To assess the climatic response of mercury accumulation by trees, the average daily data for 1933–2021 from the Tomsk weather station were used. **Results.** The authors have obtained the data on the gross content and geochemical features of mercury accumulation by Scots pine wood in the territory of the Tomsk region. The results of calculations of the main geoecological indicators of the mercury load indicate an excess of element concentrations relative to the background, the average for terrestrial plants, as well as according to scandium rationing data. The paper highlights the period of increased mercury concentration in pine wood (1941–1974) as a result of the influence of the city industry. A similar pattern of pollutant accumulation for 1970–1986 was revealed in the study area, with an excess of 1.6–1.8 times relative to adjacent environments (soil, solid snow sediment, pine needles, mosses). Hg accumulation by wood is affected by the precipitation amount, both per year and during the growing season and during the period with positive temperatures, as well as the duration of precipitation during the year and the growing season.

Keywords: mercury, wood, pine, dendrogeochemistry, Tomsk district, nature-manmade ecosystem, geoecological and climatic factors

Acknowledgements: The study was carried out within the framework of the grant from the Russian Science Foundation (project no. 20-64-47021) <https://rscf.ru/en/project/20-64-47021/>. Data processing was carried out within the framework of the budget project of the IMCES SB RAS (Tomsk).

For citation: Lyapina E.E., Le Thi Hong Shang, Krachnakova M.G., Baranovskaya N.V., Markelova A.N., Zolotov S.Yu. Dendrogeochemistry of Hg according to the study of Scots pine (*Pinus Sylvestris*) in the Tomsk region. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 8, pp. 125–136. DOI: 10.18799/24131830/2024/8/4602

Введение

Ртуть (Hg) – серебристо-белый жидкий металл первого класса опасности [1–3]. С учетом самого высокого показателя токсичности для живых организмов среди других элементов и широкого спектра проявления негативного воздействия особое значение приобретает изучение распределения данного элемента в компонентах окружающей среды. Рассматривая поступление ртути в окружающую среду, различают две основные группы источников: природные и техногенные [4]. Природные процессы определяют глобальный круговорот

ртути, локальный и региональный техногенез, ведущие к загрязнению окружающей среды [1]. По оценкам специалистов, эмиссия ртути в окружающую среду оценивается количествами от 6500 до 8200 т/год, из которых на долю естественных выбросов приходится от 4600 до 5300 т/год [5]. Несмотря на то, что объёмы поступления ртути в окружающую среду естественным путём из земной коры и глубин мирового океана превышают объёмы, производимые антропогенными источниками, её промышленная составляющая более сконцентрирована и распределена вблизи источника за-

грязнения. Высокая токсичность всех соединений этого металла определяет актуальность и необходимость изучения распределения и накопления Hg в природных компонентах окружающей среды [2, 3, 6–8]. На территории Томской области проведены исследования по изучению содержания ртути в кернах тополя (*Populus balsamifera* L.) (94 нг/г) и сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) (80 нг/г) [6]; твердом осадке снега (201 нг/г) [8]; листьях тополя (25 нг/г) [4], почвах (56 нг/г) [9], мхах (27–90 нг/г), лишайниках (35–337 нг/г), грибах (156–2367 нг/г) [6] и др. Эти исследования дают представление об основных антропогенных источниках поступления ртути в окружающую среду г. Томска, к которым относятся: транспорт, печное отопление, тепловые электростанции, а также цементные заводы [4, 6–8].

Наибольшую актуальность в эколого-геохимических исследованиях имеют методы, которые позволяют оценить не только фактическое накопление ртути в данный момент времени, но и установить динамику ее поступления. К таким методам относится дендрогеохимия. Дендрогеохимический метод исследования даёт возможность получить информацию о загрязнении окружающей среды металлами, радионуклидами и другими химическими элементами, а также их соединениями путем изучения особенностей строения и вещественного состава годовых колец древесных растений [7, 10–13]. Метод позволяет отследить изменения накопления ртути за достаточно большой промежуток времени. Он малотравматичен для деревьев, не требует дорогостоящего оборудования и специальных навыков [9]. Данные, полученные при помощи изучения вещественного состава древесины, позволяют выявить изменчивость годового прироста древесины, установить хронологию событий, влияющих на прирост древесных растений, воссоздать условия внешней среды, а также оценить экологическую обстановку территории исследования [12, 14–17]. Ученые широко используют метод дендрогеохронологии для получения информации о содержании химических элементов, источниках их поступления, факторах, влияющих на аккумуляцию поллютантов древесными растениями [7, 18–20]. Известен опыт применения данного метода для оценки выбросов Hg от хлорно-щелочного завода в западной Европе [21]. Л.П. Рихвановым и др. была сделана первая попытка изучения уровня накопления делящихся элементов в годовых кольцах деревьев в зоне влияния Сибирского химического комбината. При этом методом осколочной (*f*) радиографии было обнаружено присутствие изотопов ртути, которые накапливались в определенные временные интервалы и отчетливо фиксировали направление основной «розы ветров»

в районе предприятия ядерного топливного цикла [11]. Современные исследования показывают, что ежегодно образующиеся годовые кольца деревьев являются «накопителем» ртути в момент ассимиляции. Комбинация полевых исследований и исследований в лабораториях показывает, что Hg поступает в годовые кольца деревьев в основном из атмосферы, через листву/хвою ассимилируется в древесную ткань [12, 22–24]. Отдельно стоит отметить влияние природных факторов, таких как рельеф, геохимическая обстановка и климатическая характеристика района исследования [25–27].

Цель исследования – количественная оценка содержания ртути в годовых кольцах сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) на территории Томского района, а также выявление геоэкологических и климатических факторов, оказывающих влияние на аккумуляцию поллютанта древесными кернами.

Материалы и методы

В ходе исследования были отобраны образцы годовых колец сосны обыкновенной *Pinus sylvestris* L. (далее сосна). Устойчивость к воздействию неблагоприятных факторов позволяет отнести хвойные виды деревьев к наиболее подходящим в дендрогеохимических исследованиях [9]. Выбор кернов сосны в качестве индикатора обусловлен широким ареалом её распространения, что позволяет сравнить полученные результаты с данными ранее проведенных исследований [6, 7, 11]. Как правило, годовые кольца сосны представлены четко, поэтому измерение ширины колец возможно с достаточно высокой точностью.

Точки отбора проб представляют собой различные сценарии антропогенного воздействия, такие как: бытовое загрязнение, кустарные промыслы, промышленные зоны и транспортные системы города. Всего в исследовании было задействовано четыре точки отбора проб. Первые две точки: с. Пашино («Пашино») и мкр. Тимирязево («Тимирязево») испытывают минимальное влияние г. Томска согласно преобладающему многолетнему направлению ветра, т. к. расположены западнее города. Поэтому были названы условно фоновыми. Две другие точки вблизи исследовательского ядерного реактора научно-исследовательского Томского политехнического университета («Реактор») и вблизи ООО «Томскнефтехим» («Нефтехим») испытывают воздействие северного промышленного узла (СПУ) г. Томска.

Отбор проб осуществлялся в соответствии с требованиями, которые предъявляются к отбору образцов древесины в дендрохронологических и дендроклиматических исследованиях [9]. На изучаемой пробной площадке выбиралось прямоствольное дерево, внешне неповрежденное (не подвер-

гавшееся пожару, сильной ветровой и снеговой нагрузке, рубке). При этом из условий местопроизрастания желательным являлось постоянство почвенно-грунтовых условий (отсутствие процессов заболачивания, иссушения, смыва) и ровная поверхность. Керна отбирали с использованием возрастного бурава Haglof с западной или восточной стороны дерева, на высоте 1,3 м от основания ствола. С одного учетного дерева отбиралось 1–2 керна древесины. Транспортировка образцов древесины осуществлялась в твердой таре (тубусе), чтобы исключить их поломку. После взятия образцы древесины подвергались сушке до постоянной массы при комнатной температуре. Пробы отбирали в конце вегетационного периода (август 2021 г.), в сезон низкой физиологической активности дерева. Если позволяет длина бура, то дерево просверливается насквозь и за один прием берется образец по двум противоположным радиусам [9]. Извлеченные пробы помещались в бумажные пеналы с указанием номера точки, дерева и стороны света. Пробоподготовка образцов к анализу включала в себя: высушивание при комнатной температуре в бумажных пеналах, зачистку и шлифовку керна, датирование и маркировку колец, разделение керна по годичным кольцам и их измельчение.

Определение количества и ширины годовых колец в кернах сосны проводили на приборе LINTAB с помощью программного обеспечения TSAP-Win и LIGNOVISION с точностью 0,01 мм в лаборатории динамики и устойчивости экосистем Института мониторинга климатических и экологических систем СО РАН (г. Томск).

Данные по валовым концентрациям ртути в кернах сосны получены на ртутном анализаторе РА-915+ методом атомной абсорбции с помощью приставки ПИРО-915. Биологическую матрицу пробы разлагали методом пиролиза при температуре в печи 850°C. Предел обнаружения ртути 5 нг/г, точность определения 5 нг/г, концентрации элемента рассчитаны на 1 г сухого вещества [28]. Аналитические исследования проводили в учебно-научной лаборатории на базе Инженерной школы природных ресурсов НИ ТПУ. Всего было проанализировано 337 проб.

Методика обработки результатов включала расчет эколого-геохимических показателей:

- K_c – коэффициент концентрации относительно фона:

$$K_c = C_{Hg} / C_{ф},$$

где C_{Hg} – концентрация Hg в пробе, нг/г; $C_{ф}$ – фоновая концентрация Hg, нг/г (8,4 нг/г) [25];

- ВДК (TPC – temporarily permissible concentration) – временно допустимая концентрация:

$$ВДК = C_{Hg} / 2C_{ф},$$

где C_{Hg} – концентрация Hg в пробе, нг/г; $C_{ф}$ – фоновая концентрация Hg, нг/г (8,4 нг/г) [25];

- K_N – кларк ноосферы:

$$K_N = C_{Hg} / K_{NHg},$$

где C_{Hg} – концентрация Hg в пробе, нг/г; K_{NHg} – кларк Hg в ноосфере (180 нг/г) [29];

- K_{LM} – коэффициент концентрации относительно среднего для живого вещества:

$$K_{LM} = C_{Hg} / C_{LMHg},$$

где C_{Hg} – концентрация Hg в пробе, нг/г; C_{LMHg} – среднее содержание Hg в живом веществе, нг/г (50 нг/г) [30];

- K_{LP} – коэффициент концентрации относительно среднего для наземных растений:

$$K_{LP} = C_{Hg} / C_{LPHg},$$

где C_{Hg} – концентрация Hg в пробе, нг/г; C_{LPHg} – среднее содержание Hg в наземных растениях, нг/г (15 нг/г) [7];

- K_M – коэффициент концентрации относительно В. Markert [31]:

$$K_M = C_{Hg} / C_{MHg},$$

где C_{Hg} – концентрация Hg в пробе, нг/г; C_{MHg} – содержание Hg в сухом веществе растений по В. Markert (100 нг/г) [31];

- Fe – фактор обогащения (нормирование по Sc):

$$Fe = (C_{Hg} / K_{Hg}) / (C_{Sc} / K_{Sc}),$$

где C_{Hg} – концентрация Hg в пробе, нг/г; K_{Hg} – кларк Hg сухом веществе растений (100 нг/г, по Markert) [31]; C_{Sc} – концентрация Sc в пробе, мг/кг [7]; K_{Sc} – содержание Sc (0,02 мг/кг по Markert) [31].

Для оценки климатического отклика накопления ртути деревьями использовали среднесуточные данные по метеостанции г. Томска в период с 1933 по 2021 гг. (89 лет). Оценивали связь накопления ртути древесными кернами с температурой воздуха, количеством и продолжительностью осадков, направлением ветра в течение года, вегетационного периода, при положительных и отрицательных температурах.

Статистическая обработка результатов исследования проводилась с использованием пакета STATISTICA 6.1.

Результаты и обсуждение

Распределение содержания ртути в кернах сосны на территории опробования носит неравномерный характер, что подтверждается результатами расчета коэффициента вариации (C_v 104–222%) (табл. 1).

Средние концентрации ртути в кернах сосны изученных деревьев варьируют в пределах 3–99 нг/г.

Наименьшее содержание Hg отмечается в точке «Реактор», наибольшее – в точках «Нефтехим» и «Тимирязево» (в пределах ошибки измерений). В кернах исследованных деревьев содержание Hg превышает концентрации элемента, отмеченные в ранее проведенных на территории исследованиях [6, 7], за исключением точки «Реактор». Следует отметить, что территориально поступление Hg в керн сосны значимо не различается в зависимости от расположения по отношению к городу с учетом преобладающего направления ветра. Исключение составляют данные в точке «Реактор».

Таблица 1. Статистические параметры содержания ртути в кернах *Pinus sylvestris* L. на территории Томского района (без ураганных значений)

Table 1. Statistical parameters of mercury concentration in *Pinus sylvestris* L. cores on the territory of the Tomsk district (without hurricane values)

Точка Point	Возраст, лет Age, years	Концентрация Hg, нг/г Hg concentration, ng/g			Медиана Median	Стандартное отклонение Standard deviation	Коэффициент вариации Coefficient of variation
		среднее average	min	max			
Пашино Pashino	80	86,3±21,6	5	1088	17,7	191,6	222
Тимирязево Timiryazovo	79	98,6±21,6		635	45,3	141,0	143
Реактор Reactor	89	33,8±3,8		137	24,8	35,1	104
Нефтехим Neftekhim	81	99,8±19,7		982	29	176,4	177

Интересно отметить синхронность хронологии поступления Hg во всех точках опробования (рис. 1), также за исключением точки «Реактор». Кратность превышения среднего значения в период с 1941 по 1974 гг. в точках «Пашино», «Тимирязево» и «Нефтехим» составляет 15,5; 7 и 5,1, соответственно. Для иллюстрации полученных периодов повышенных концентраций ртути в кернах сосны были построены столбчатые диаграммы, демонстрирующие два периода со значимо отличающимися средними содержаниями Hg в кернах всех исследованных деревьев (рис. 2). Резкий рост содержания ртути в древесине с 1941 г. объясняется эвакуацией около 30 промышленных предприятий в период Великой отечественной войны (1941–1945 гг.) из европейской части России в г. Томск. Среди них – ярославский «Электромашиностроительный завод»; московские заводы: «Манометр», «Первый подшипниковый завод», «Электропровод», «Мос-

кабель», «Электроламповый завод», «Красный богатырь»; ленинградские заводы: «Радист» и «Электросила» и др. [32].

В точке «Реактор» выделили два периода повышенных концентраций элемента: 1936–1966 гг. (61,6±7 нг/г) и 1995–2007 гг. (44,3±11,8 нг/г). Между ними с 1970 по 1994 гг. «перешеек» с минимальным содержанием поллютанта – 9,7±1,8 нг/г. Кратность превышения в периоды повышенных концентраций ртути составляет 6,3 и 1,4, соответственно. В период максимального среднего содержания (1936–1966 гг.) на территории г. Томска начинают производственную деятельность карандашная, обувная, табачная фабрики и химзавод. С начала 50-х гг. XX в. отмечается рост строительства государственного жилья. До 1961 г. существовала Томская железная дорога [32].

Динамика накопления ртути в древесине всех исследованных деревьев свидетельствует о снижении поступления поллютанта от 1933 к 2021 гг., что подтверждают графики линейных трендов (рис. 1).

Общим характером аккумуляции ртути кернами *Pinus sylvestris* L. отмечаются точки «Пашино»–«Тимирязево» (r 0,32 при $P=0,05$) и «Тимирязево»–«Реактор» (r 0,22 при $P=0,05$). Статистическая значимость полученных оценок определялась с помощью двустороннего t -критерия нулевой гипотезы, при определении доверительных интервалов коэффициентов корреляции использовался уровень значимости 0,05. Критическое значение коэффициента корреляции для выборки 80 лет составляет 0,22 при $P=0,05$. Влияния накопления ртути на ширину годичных колец всех исследованных деревьев выявлено не было.

По данным расчета геоэкологических показателей (табл. 2) были выявлены превышения содержания ртути относительно фона и, как следствие, расчетного параметра ВДК, среднего для живого вещества и наземных растений, за исключением точки «Реактор». Данные расчетов также подтверждают обогащение кернов элементом по результатам расчёта Fe (нормирования по скандию). Нормирование по В. Market (1991) показывает отсутствие накопления поллютанта деревьями всех исследованных точек. Полученные содержания также ниже кларка ноосферы.

Сравнивая валовое содержание ртути в древесине сосны Томского района с концентрациями в сопредельных средах (рис. 3), следует отметить превышение по всем представленным на рисунке средам в: почвы 1,2–2,7; твердый осадок снега 1,6–1,8; хвоя 6,1–13,3; мхи 1,2–2,5; грибы 1,1–1,2; древесина сосны 1,6–1,8; древесина тополя 1,4–1,6 раз, за исключением эпифитных видов лишайников [6].

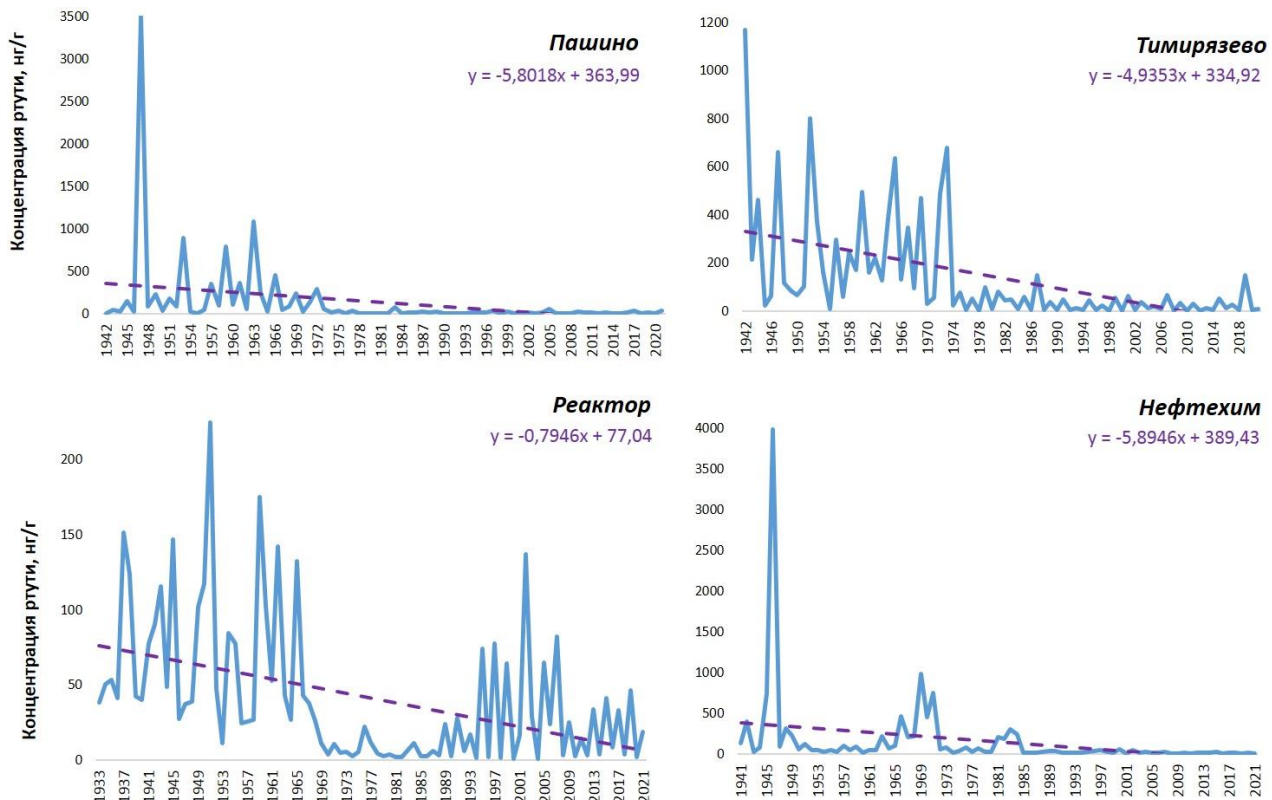


Рис. 1. Динамика поступления Hg в керн *Pinus sylvestris* L. на территории Томского района
Fig. 1. Dynamics of Hg entry into Scots pine core in the Tomsk region

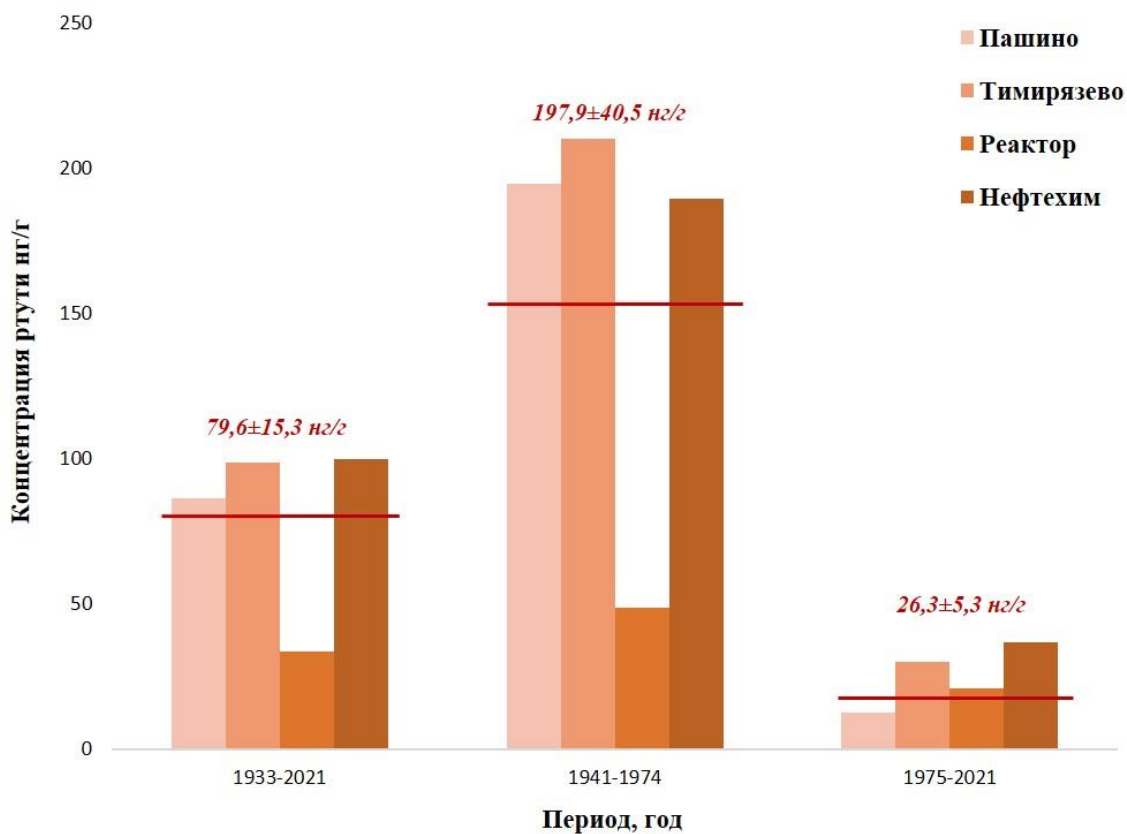


Рис. 2. Периоды аккумуляции ртути кернами *Pinus sylvestris* L. на территории Томского района
Fig. 2. Periods of mercury accumulation in *Pinus sylvestris* L. cores in the Tomsk region

Таблица 2. Геоэкологические показатели ртутной нагрузки на территорию Томского района по данным изучения керна *Pinus sylvestris* L. в период с 1941 по 2021 гг. (без ураганных значений)

Table 2. Geoeological indicators of mercury load on the territory of the Tomsk region according to the study of *Pinus sylvestris* L. in the period from 1941 to 2021 (without hurricane values)

Точки Points	Kc	ВДК TPC	K _N	K _{LM}	K _{LP}	K _M	Fe
Пашино Pashino	9,1	4,6	0,5	1,7	5,6	0,8	4,2
Тимирязево Timiryazovo	10,0	5,0	0,4	1,5	5,1	0,8	3,8
Реактор Reactor	3,8	1,9	0,2	0,6	2,1	0,3	1,6
Нефтехим Neftekhim	10,7	5,3	0,5	1,8	6,0	0,9	4,5

Примечание: раздел материалы и методы.

Note: section materials and methods.

В точке «Реактор» среднее содержание ртути в древесине ниже такового в твердом осадке снега [8], древесине тополя и сосны [6] на территории г. Томска и Томского района. Кроме того, выявлен похожий характер в аккумуляции поллютанта древесиной сосны в точках «Реактор» и «Яр» ($r = -0,56$; $P = 0,05$) в период 1970–1984 гг., а также «Самусь» в период 1971–1986 гг. ($r = 0,4$; $P = 0,05$). Критическое значение коэффициента корреляции для выборок 25 («Яр») и 16 лет («Самусь») составляет 0,5 и 0,4 при $P = 0,05$, соответственно.

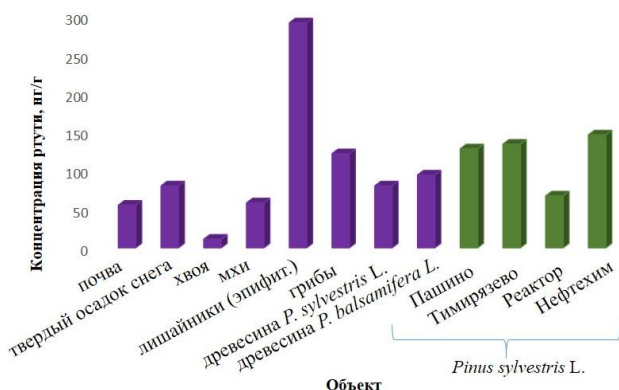


Рис. 3. Содержание ртути в объектах окружающей среды на территории Томского района [5, 6, 9, 26]

Fig. 3. Mercury content in environmental objects in the Tomsk region [5, 6, 9, 26]

В результате проведенного корреляционного анализа линейная зависимость выявлена между количеством осадков при отрицательных температурах и содержанием ртути в годовых кольцах сосны во всех точках исследования. Преобладающими ветрами в течение всего года, оказывающими воздействие на поступление ртути в керны сосны на

территории исследования, являются северо-восточные и юго-западные ($r = 0,22$ при $P = 0,05$). Юго-западные ветры также значимы в течение вегетационного периода, при положительных и отрицательных температурах ($r = 0,22$ при $P = 0,05$).

Для подтверждения влияния метеопараметров на поступление элемента в древесину применили кластерный анализ и построили дендрограмму корреляционной матрицы концентрации Hg и метеопараметров (рис. 4). Анализ дендрограммы показывает, что в первую очередь на поступление элемента в древесину сосны влияет сумма осадков, как за год, так и в течение вегетационного периода и в период с положительными температурами. Кроме того, важным является количество дней с осадками в течение года и за вегетационный период. Влияние на вегетацию оказывает накопленный в течение зимнего периода снег. Количество дней с температурами $>0^{\circ}\text{C}$ и сумма температур за этот период также важны при исследовании поступления ртути в деревья.

Результаты факторного анализа подтверждают полученные ранее зависимости. Выделяются два основных фактора, суммарное воздействие которых составляет 52,1%. «Фактор 1» (32,3%) указывает, что главными метеопараметрами, влияющими на накопление Hg в древесине, являются осадки при температуре $>0^{\circ}\text{C}$ и продолжительность данного периода. Следующий по значимости «Фактор 2» (19,8%), который выделил осадки, как в течение календарного года, так и за зимний период, в том числе и предыдущего года. Все зависимости характеризуются положительным знаком.

То есть с повышением температуры и увеличением количества осадков содержание ртути в древесине сосны возрастает. Полученные закономерности согласуются с данными, приведенными для хвои сосны [6] на территории Томской области и Сибирского региона в целом [26]. При повышении температуры воздуха пары ртути с подстилающей поверхности становятся более активными наряду с биологическими и биохимическими реакциями окружающей среды, которые способствуют биохимической кинетике растения, что подтверждает способность накапливать элемент растениями [17, 27].

В период с 1933 по 2021 гг. наблюдается повышение температуры, как за год, так и в течение вегетационного периода. Увеличивается не только температура воздуха, но и продолжительность периода с положительными температурами. Количество осадков наоборот снижается. Отдельно стоит отметить, что во временном интервале с повышенными концентрациями ртути в древесных кернах (1941–1974 гг.) отмечается наибольшая сумма осадков в течение как вегетационного периода, так и за год. Данная тенденция отображена в расчетах, представленных на рис. 4.

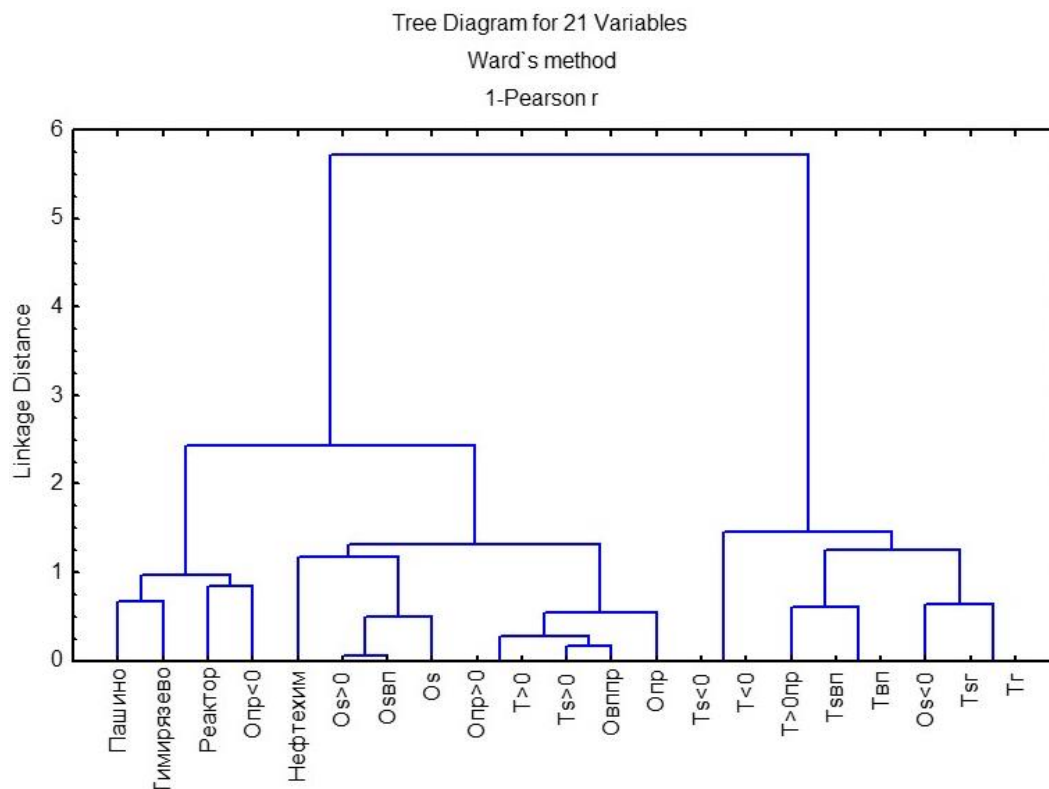


Рис. 4. Дендрограмма корреляционной матрицы влияния климатических параметров на поступление ртути в годовые кольца *Pinus sylvestris* L. на территории Томского района (1-Pearson $r=0,21$), показатели: Температура: Тг – среднегодовая; Тsг – сумма за год; Твп – за вегетационный период; Тсвп – сумма за вегетационный период; Т>0; Т>0s – сумма положительных температур; Т>0пр – продолжительность периода с положительными температурами; Т<0; Т<0s – сумма отрицательных температур; Осадки: Оsг – сумма за год; Опр – количество дней с осадками в течение года; Оsвп – сумма за вегетационный период; О>0s – сумма при положительных температурах; О<0s – сумма при отрицательных температурах; О>0пр – количество дней с осадками при положительных температурах; О<0пр – количество дней с осадками при отрицательных температурах

Fig. 4. Dendrogram of the correlation matrix of the affect of climatic parameters on mercury flow into the annual rings of *Pinus sylvestris* L. in the Tomsk region, indicators: Temperature: Тг – average annual; Тsг – amount for the year; Твп – during the growing (vegetative) season; Тсвп – amount for the growing season; Т>0; Т>0s – sum of positive temperatures; Т>0пр – duration of the period with positive temperatures; Т<0; Т<0s – sum of negative temperatures; Precipitation: Оsг – amount for the year; Опр – number of days with precipitation during the year; Оsвп – amount for the growing season; О>0s – sum at positive temperatures; О<0s – sum at negative temperatures; О>0пр – number of days with precipitation at positive temperatures; О<0пр – number of days with precipitation at subzero temperatures

Результаты расчета корреляционного анализа выявили влияние на аккумуляцию ртути северо-восточных и юго-западных ветров в течение года. Юго-западные ветра играют важную роль в поступлении элемента в течение вегетационного периода, при положительных температурах и в течение зимнего периода. Кластерный анализ подтвердил преобладающую роль в атмосферном переносе ртути южного, восточного и западного ветров за год, в течение вегетационного периода, при положительных и отрицательных температурах, а также их продолжительность. Что совпадает с долей ветров этих направлений, о чем свидетельствует роза ветров как за весь период исследования, так и в периоды повышенных концентраций (рис. 5).

Заключение

Средние содержания Hg в кернах сосны превышают ранее полученные концентрации для Томского района. Кроме того, результаты расчетов геоэкологических параметров свидетельствуют об обогащении элементом древесины сосны на территории Томского района по сравнению с фоном, средним для наземных растений, а также по данным нормирования по скандию.

Следует отметить синхронность поступления поллютанта в древесину на территории Томского района. Выделен период повышенных концентраций ртути с 1941 по 1974 гг. в древесине сосны трёх деревьев из четырех. Возможно, это связано с эвакуацией промышленных предприятий в годы Великой отечественной войны.

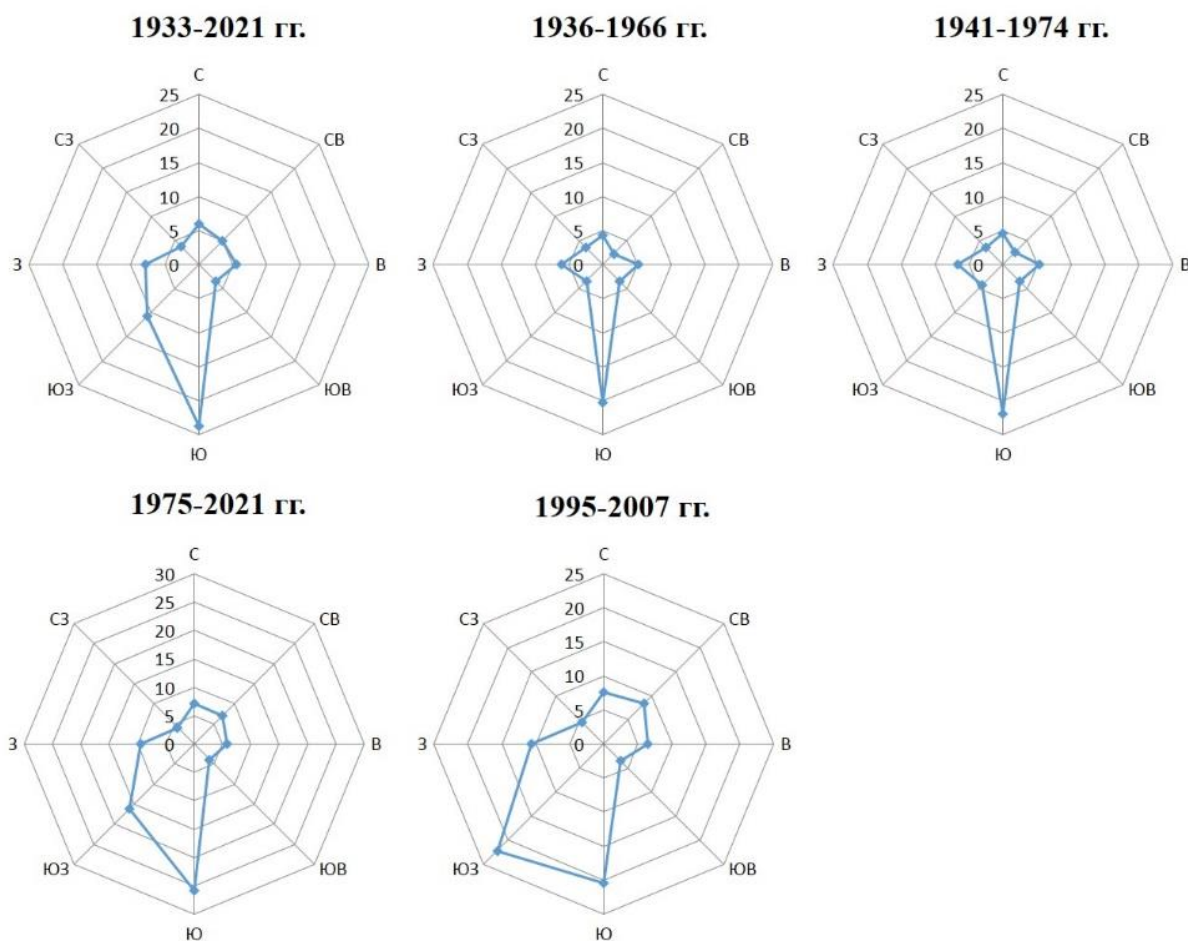


Рис. 5. Роза ветров по данным метеостанции г. Томска
Fig. 5. Wind rose according to the weather station in Tomsk

В точках «Реактор», «Яр» и «Самусь» в период 1970–1984 гг. выявлен похожий характер аккумуляции поллютанта. Однако средние содержания ртути превышают ранее полученные в 1,6–1,8 раз. Общим характером накопления ртути древесиной *Pinus sylvestris* L. отмечаются точки «Пашино», «Тимирязево» и «Реактор».

Основными метеопараметрами, влияющими на накопление Hg древесиной, определены сумма

осадков как за год, так и в течение вегетационного периода и в период с положительными температурами. Кроме того, важным является количество дней с осадками в течение года и за вегетационный период. Вегетация нового года зависит от влаги, накопленной в предыдущий зимний период. Количество дней с температурами $>0^{\circ}\text{C}$ и сумма температур за этот период также важны при исследовании поступления ртути в деревья.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Касимов Н.С., Башкин В.Н. Биогеохимия. – М.: Научный мир, 2004. – 647 с.
2. Иванов В.В. Экологическая геохимия элементов. – М: Экология, 1997. – 576 с.
3. Ковальский В.В. Геохимическая экология. – М.: Наука, 1974. – 299 с.
4. Ртуть в листьях тополя на урбанизированных территориях Юга Сибири и Дальнего Востока / Д.В. Юсупов, Л.П. Рихванов, Ю.В. Робертус, Е.Е. Ляпина, Е.М. Турсуналиева, Н.В. Барановская, Н.А. Осипова // Экология и промышленность России. – 2018. – Т. 22. – № 12. – С. 56–62. DOI: 10.18412/1816-0395-2018-12-56-62.
5. Ракитский В.Н., Синицкая Т.А., Скупневский С.В. Современные проблемы загрязнения ртутью окружающей среды (обзор литературы) / Гигиена и санитария. – 2020. – № 5. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sovremennyye-problemy-zagryazneniya-rtutyu-okruzhayushey-sredy-obzor-literatury> (дата обращения: 22.10.2023).
6. Ляпина Е.Е. Экогеохимия ртути в природных средах Томского региона: дис. ...канд. геол.-минерал. наук. – Томск, 2012. – 154 с.
7. Годовые кольца сосны обыкновенной (*Pinus Sylvestris* L.) – индикатор геохимической обстановки и хронологического изменения химического элементного состава окружающей среды / А.С. Миронова, Л.П. Рихванов, Н.В. Барановская,

- А.Ф. Судыко // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 4. – С. 106–116. DOI: 10.18799/24131830/2020/1/2452.
8. Таловская А.В. Экогеохимия атмосферных аэрозолей на урбанизированных территориях юга Сибири: дис. ... д-ра геол.-минерал. наук. – Томск, 2022. – 170 с.
9. Матвеев С.М., Румянцев Д.Е. Дендрохронология. – Воронеж: ВГЛТА, 2013. – 140 с.
10. Ляпина Е.Е. Мониторинг техногенной трансформации городских почв (на примере г. Томска) // Экология. Экономика. Информатика. Серия: Системный анализ и моделирование экономических и экологических систем. – 2020. – Т. 1. – № 5. – С. 154–160. DOI: 10.23885/2500-395X-2020-1-5-154-160.
11. Рихванов Л.П., Архангельская Т.А., Замятина Ю.Л. Дендрорадиография как метод ретроспективной оценки радиозоологической ситуации: монография. – Томск: Дельтаплан, 2015. – 148 с.
12. Comparison of co-located ice-core and tree-ring mercury records indicates potential radial translocation of mercury in whitebark pine / N. Chellman, A. Csank, M.S. Gustin, M.M. Arienzo, M.V. Estrada, J.R. McConnel // *Science of The Total Environment*. – 2020. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.140695.
13. Clackett S.P., Porter T.J., Lehnher I. 400-year record of atmospheric mercury from tree-rings in Northwestern Canada // *Environmental Science&Technology*. – 2018. DOI: 10.1021/acs.est.8b01824.
14. Gacnik J., Gustin M.S. Tree rings as historical archives of atmospheric mercury: a critical review // *Science of The Total Environment*. – 2023. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.165562.
15. Investigation of the biochemical controls on mercury uptake and mobility in trees / M.S. Gustin, S.M. Dunham-Cheatham, J.F. Harper, Cho Won-Gyu, J.D. Blum, M.W. Johnson // *Science of The Total Environment*. – 2022. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.158101.
16. Mercury accumulation in tree rings: observed trends in quantity and isotopic composition in Shenandoah National Park, Virginia / T.M. Scanlon, A.L. Riscassi, J.D. Demers, T.D. Camper, T.R. Lee, D.L. Druckenbrod // *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*. – 2020. DOI: 10.1029/2019JG005445.
17. Xu Liu, Xun Wang, Dingyong Wang. Assessment of tree-ring mercury radial translocation and age effect in Masson pine: Implications for historical atmospheric mercury reconstruction // *Journal of Environmental Sciences*. – 2024. DOI: 10.1016/j.jes.2022.10.02.7.
18. Gworek B., Dmuchowski W., Baczewska-Dąbrowska A.H. Mercury in the terrestrial environment: a review // *Environmental Science Europe*. – 2020. DOI: 10.1186/s12302-020-00401-x.
19. Characterization of mercury concentration from soils to needle and tree rings of Schrenk spruce (*Picea schrenkiana*) of the middle Tianshan Mountains, northwestern China / Huhu Kang, Xiaohong Liu, Junming Guo, Bo Wang, Guobao Xu, Guoju Wu, Shichang Kang, Jie Huang // *Ecological Indicators*. – 2019. DOI: 10.1016/j.ecolind.2019.04.066.
20. Reconstructing atmospheric Hg levels near the oldest chemical factory in central Europe using a tree ring archive / T. Nováková, T. Navrátil, M. Schütze, J. Rohovec, Š. Matoušková, M. Hošek, T.M. Grygar // *Environmental Pollution*. – 2022. DOI: 10.1016/j.envpol.2022.119215.
21. Dendrochemical assessment of mercury releases from a pond and dredgedsediment landfill impacted by a chlor-alkali plant / F. Maillard, O. Girardclos, M. Assad, C. Zappellini, J.M. Pérez Mena, L. Yung, C. Guyeux, S. Chrétien, G. Bigham, C. Cosio, M. Chalot // *Environmental Research*. – 2016. – P. 122–126. DOI: 10.1016/j.envres.2016.03.034.
22. Critical review on biogeochemical dynamics of mercury (Hg) and its abatement strategies/ Arun Dev Singh, Kanika, Jaspreet Kour // *Chemosphere*. – 2023. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2023.137917.
23. Янин Е.П. Ртуть в окружающей среде промышленного города. – М.: ИМГРЭ, 1992. – 169 с.
24. Mercury uptake by vegetation and impacts on global mercury cycling / Jun Zhou, D. Obrist, A. Dastoor, M. Jiskra, A. Ryjkov // *Nature Reviews Earth&environment*. – 2021. – P. 269–284. DOI: 10.1038/s43017-021-00146-y.
25. Содержание ртути в почвах и биологических объектах природных и техногенных территорий / А.Г. Горохова, А.И. Иванов, Н.А. Язынина, С.Е. Ермолаев, М.В. Фerezанова // *Теоретическая и прикладная экология*. – 2017. – № 4. – С. 100–105.
26. Ляпина Е.Е., Шворнева Е.В., Воронин Н.Н. Содержание ртути в хвое Юго-Западного Прибайкалья // *Оптика атмосферы и океана*. – 2018. – № 1. – С. 69–72. DOI: 10.15372/AOO20180111.
27. Lyapina E.E., Peregodina E.V. Mercury pressure in the Tomsk region based on biomonitoring studies // *Limnology and Freshwater Biology*. – 2022. – P. 1292–1294. DOI: 10.31951/2658-3518-2022-A-3-1292.
28. Mashyanov N., Pogarev S., Ryzhov V. Mercury thermo-speciation in contaminated soils and sediments // *RMZ: Materials and Geoenvironment*. – 2004. – P. 1980–1983. DOI: 10.1007/s00128-021-03159-x.
29. Глазовская М.А. Геохимия природных и техногенных ландшафтов СССР. – М.: Высшая школа, 1988. – 327 с.
30. Виноградов А.П. Проблемы геохимии и космохимии. Избранные труды. – М.: Наука, 1988. – 336 с.
31. Markert B. Plants as biomonitors. Indicators for heavy metals in the terrestrial environment. – Weinheim: VCH, 1993. – 644 p.
32. Томская область в предвоенные, военные годы и послевоенное восстановление: Юб. стат. сб./Томскстат – Томск, 2020. – 105 с.

Информация об авторах

Елена Евгеньевна Ляпина, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории физики климатических систем Института мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Россия, 634055, г. Томск, пр. Академический, 10/3. eeldv@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6116-0567>

Ле Тхи Хонг Шанг, аспирант отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. thihongshang1@tpu.ru; <https://orcid.org/0009-0004-6708-8825>

Мария Германовна Крачнакова, студент отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. mgk8@tpu.ru; <https://orcid.org/0009-0006-0848-0645>

Наталья Владимировна Барановская, доктор биологических наук, профессор отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. natalya.baranovs@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3729-800X>

Анна Николаевна Маркелова, младший научный сотрудник лаборатории биоинформационных технологий Института мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Россия, 634055, г. Томск, пр. Академический, 10/3. maranna.levoka@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7462-2660>

Сергей Юрьевич Золотов, кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории физики климатических систем Института мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Россия, 634055, г. Томск, пр. Академический, 10/3. zolotov@asu.tusur.ru; <https://orcid.org/0000-0001-5120-8985>

Поступила в редакцию: 29.02.2024

Поступила после рецензирования: 03.04.2024

Принята к публикации: 16.05.2024

REFERENCES

1. Kasimov N.S., Bashkin V.N. *Biogeochemistry*. Moscow, Nauchny mir Publ., 2004. (In Russ.)
2. Ivanov V.V. *Ecological geochemistry of elements*. Moscow, Ekologiya Publ., 1997. 576 p. (In Russ.)
3. Kovalskiy V.V. *Geochemical ecology*. Moscow, Nauka Publ., 1974. 300 p. (In Russ.)
4. Yusupov D.V., Rikhvanov L.P., Robertus Yu.V., Lyapina E.E., Tursunaliyeva E.M., Baranovskaya N.V., Osipova N.A. Mercury in poplar leaves in urbanized areas of Southern Siberia and the Far East. *Ecology and industry of Russia*, 2018, vol. 22, no. 12, pp. 56–62. (In Russ.) DOI: 10.18412/1816-0395-2018-12-56-62.
5. Rakitskiy V.N., Sinitskaya T.A., Skupnevsky S.V. Modern problems of mercury pollution of the environment (literature review). *Hygiene and sanitation*, 2020. (In Russ.) Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/sovremennye-problemy-zagryazneniya-tutuyu-okruzhayushchey-sredy-obzor-literatury> (accessed 22 October 2023).
6. Lyapina E.E. *Ecogeochemistry of mercury in natural environments of the Tomsk region*. Cand. Dis. Tomsk, 2012. 154 p. (In Russ.)
7. Mironova A.S., Rikhvanov L.P., Baranovskaya N.V., Sudyko A.F. Annual rings of Scots pine (*Pinus Sylvestris* L.) – an indicator of the geochemical situation and chronological changes in the chemical elemental composition of the environment. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 1, pp. 106–116. (In Russ.) DOI: 10.18799/24131830/2020/1/2452.
8. Talovskaya A.V. *Ecogeochemistry of atmospheric aerosols in urbanized territories of southern Siberia*. Cand. Dis. Tomsk, 2022. 170 p. (In Russ.)
9. Lyapina E.E. Monitoring of technogenic transformation of urban soils (on the example of Tomsk). *Ecology. Economy. Computer science. Series: System analysis and modeling of economic and ecological systems*, 2020, vol. 1, no. 5, pp. 154–160. (In Russ.) DOI: 10.23885/2500-395X-2020-1-5-154-160.
10. Matveev S.M., Rummyantsev D.E. *Dendrochronology*. Voronezh, VGLTA Publ., 2013. 140 p. (In Russ.)
11. Rikhvanov L.P., Arkhangelskaya T.A., Zamyatina Y.L. *Dendroradiography as a method of retrospective assessment of the radioecological situation: monograph*. Tomsk, Deltaplan Publ., 2015. 148 p. (In Russ.)
12. Chellman N., Csank A., Gustin M.S., Arienzo M.M., Estrada M.V., McConnel J.R. Comparison of co-located ice-core and tree-ring mercury records indicates potential radial translocation of mercury in whitebark pine. *Science of The Total Environment*, 2020. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.140695.
13. Clackett S.P., Porter T.J., Lehnher I. 400-year record of atmospheric mercury from tree-rings in Northwestern Canada. *Environmental Science&Technology*, 2018. DOI: 10.1021/acs.est.8b01824.
14. Gacnik J., Gustin M.S. Tree rings as historical archives of atmospheric mercury: a critical review. *Science of The Total Environment*, 2023. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.165562.
15. Gustin M.S., Dunham-Cheatham S.M., Harper J.F., Cho Won-Gyu, Blum J.D., Johnson M.W. Investigation of the biochemical controls on mercury uptake and mobility in trees. *Science of The Total Environment*, 2022. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.158101.
16. Scanlon T.M., Riscassi A.L., Demers J.D., Camper T.D., Lee T.R., Druckenbrod D.L. Mercury accumulation in tree rings: observed trends in quantity and isotopic composition in Shenandoah National Park, Virginia. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2020. DOI: 10.1029/2019JG005445.
17. Xu Liu, Xun Wang, Dingyong Wang. Assessment of tree-ring mercury radial translocation and age effect in Masson pine: implications for historical atmospheric mercury reconstruction. *Journal of Environmental Sciences*, 2024. DOI: 10.1016/j.jes.2022.10.027.
18. Gworek B., Dmuchowski W., Baczewska-Dąbrowska A.H. Mercury in the terrestrial environment: a review. *Environ Sci Eur*, 2020. DOI: 10.1186/s12302-020-00401-x.
19. Huhu Kang, Xiaohong Liu, Junming Guo, Bo Wang, Guobao Xu, Guoju Wu, Shichang Kang, Jie Huang. Characterization of mercury concentration from soils to needle and tree rings of Schrenk spruce (*Picea schrenkiana*) of the middle Tianshan Mountains, northwestern China. *Ecological Indicators*, 2019. DOI: 10.1016/j.ecolind.2019.04.066.

20. Nováková T., Navrátil T., Schütze M., Rohovec J., Matoušková Š., Hošek M., Grygar T.M. Reconstructing atmospheric Hg levels near the oldest chemical factory in central Europe using a tree ring archive. *Environmental Pollution*, 2022. DOI: 10.1016/j.envpol.2022.119215.
21. Maillard F., Girardclos O., Assad M., Zappellini C., Pérez Mena J.M., Yung L., Guyeux C., Chrétien S., Bigham G., Cosio C., Chalot M. Dendrochemical assessment of mercury releases from a pond and dredged sediment landfill impacted by a chlor-alkali plant. *Environmental Research*, 2016, pp. 122–126. DOI: 10.1016/j.envres.2016.03.034.
22. Arun Dev Singh, Kanika, Jaspreet Kour. Critical review on biogeochemical dynamics of mercury (Hg) and its abatement strategies. *Chemosphere*, 2023. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2023.137917
23. Yanin E.P. *Mercury in the environment of an industrial city*. Moscow, IMGRE Publ., 1992. 169 p. (In Russ.)
24. Jun Zhou, Obrist D., Dastoor A., Jiskra M., Ryjgov A. Mercury uptake by vegetation and impacts on global mercury cycling. *Nature Reviews Earth&environment*, 2021. DOI: 10.1038/s43017-021-00146-y.
25. Gorokhova A.G., Ivanov A.I., Yazinina N.A., Ermolaev S.E., Ferezanova M.V. Mercury content in soils and biological objects of natural and man-made territories. *Theoretical and Applied Ecology*, 2017, no. 4, pp. 100–105. (In Russ.)
26. Lyapina E.E., Shvorneva E.V., Voropai N.N. Mercury content in conifers of the Southwestern Baikal region. *Optics of the atmosphere and ocean*, 2018, no. 1, pp. 69–72. (In Russ.) DOI: 10.15372/AOO20180111.
27. Lyapina E.E., Perehudina E.V. Mercury pressure in the Tomsk region based on biomonitoring studies. *Limnology and Freshwater Biology*, 2022, pp. 1292–1294. DOI: 10.31951/2658-3518-2022-A-3-1292.
28. Mashyanov N., Pogarev S., Ryzhov V. Mercury thermo-speciation in contaminated soils and sediments. *RMZ: Materials and Geoenvironment*, 2004, pp. 1980–1983. DOI: 10.1007/s00128-021-03159-x.
29. Glazovskaya M.A. *Geochemistry of natural and man-made landscapes of the USSR*. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1988. 327 p. (In Russ.)
30. Vinogradov A.P. *Problems of geochemistry and cosmochemistry. Selected works*. Moscow, Nauka Publ., 1988. 336 p. (In Russ.)
31. Markert B. *Plants as biomonitors. Indicators for heavy metals in the terrestrial environment*. Weinheim, VCH, 1993. 644 p.
32. *Tomsk region in the pre-war, war years and post-war reconstruction*. Anniversary statistical release/Tomskstat. Tomsk, 2020. 105 p. (In Russ.)

Information about the authors

Elena E. Lyapina, Cand. Sc., Senior Researcher, Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, 10/3, Akademicheskiiy avenue, Tomsk, 634055, Russian Federation. eeldv@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6116-0567>

Le Thi Hong Shang, Postgraduate Student, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. thihongshang1@tpu.ru; <https://orcid.org/0009-0004-6708-8825>

Maria G. Krachnakova, Student, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. mgk8@tpu.ru; <https://orcid.org/0009-0006-0848-0645>

Natalia V. Baranovskaya, Dr. Sc., Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. natalya.baranovs@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3729-800X>

Anna N. Markelova, Junior Researcher, Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, 10/3, Akademicheskiiy avenue, Tomsk, 634055, Russian Federation. maranna.levoka@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0001-74622660>

Sergey Yu. Zolotov, Cand. Sc., Senior Researcher, Institute for Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, 10/3, Akademicheskiiy avenue, Tomsk, 634055, Russian Federation. zolotov@asu.tusur.ru; <https://orcid.org/0000-0001-5120-8985>

Received: 29.02.2024

Revised: 03.04.2024

Accepted: 16.05.2024

УДК 550.83+ 552.5 +553.98
DOI: 10.18799/24131830/2024/8/4628
Шифр специальности ВАК: 1.6.9

Влияние вторичных процессов на петрофизические свойства песчаной породы танопчинской свиты Тамбейского месторождения (Ямало-Ненецкий автономный округ)

Ю.Ю. Жданова✉

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск

✉yym3@tpu.ru

Аннотация. Актуальность. Актуальность работы высока, поскольку выделение взаимосвязи между фильтрационно-емкостными свойствами и вторичными процессами способствует выявлению упущенных залежей нефти и газа. Традиционные способы обработки геофизической информации становятся всё менее эффективными, соответственно, возникает необходимость во внедрении новых методик для обнаружения пропущенных залежей углеводородов.

Цель. Изучить влияние вторичных процессов на фильтрационно-емкостные свойства пород продуктивных нижних пластов танопчинской свиты Северо-Тамбейского лицензионного участка, расположенного в пределах Тамбейского месторождения, с использованием материалов геофизических исследований скважин и данных по керну. **Методы.** Метод статистически-корреляционной интерпретации представляет собой значительный прорыв в области интерпретации данных геофизических исследований скважин. Он позволяет проводить более точную интерпретацию данных по имеющимся исследованиям пластов, что дает возможность выявлять продуктивные участки скважин, на которых не удалось обнаружить углеводороды традиционными методами. Статистически-корреляционная интерпретация проводится на основе данных вторичных геохимических процессов, происходящих в пласте. **Научной новизной** работы является выявление связи интенсивности протекания вторичных процессов с петрофизическими свойствами пород нижнемелового продуктивного горизонта Тамбейского месторождения (Ямало-Ненецкий автономный округ). **Результаты и выводы.** Определена зависимость фильтрационно-емкостных свойств пород от интенсивности протекания вторичных геохимических процессов. Установлено, что такие вторичные геохимические процессы, как карбонатизация, пиритизация, ухудшают коллекторские свойства, а каолинитизация и пелитизация ведут к улучшению фильтрационно-емкостных свойств пород-коллекторов. Объяснен механизм влияния вторичных процессов на фильтрационно-емкостные свойства пород. Пелитизация калиево-полевых шпатов приводит к образованию трехслойных глинистых минералов, обладающих наибольшей площадью сорбционной поверхности и емкостью катионного обмена, в результате повышается емкость коллектора, что приводит к увеличению проницаемости в несколько раз.

Ключевые слова: интенсивности вторичных процессов, вторичная каолинитизация, вторичная пиритизация, вторичная карбонатизация, вторичная пелитизация, углеводороды, статистически-корреляционная интерпретация, фильтрационно-емкостные свойства пород, Северо-Тамбейский лицензионный участок (Ямало-Ненецкий автономный округ)

Для цитирования: Жданова Ю.Ю. Влияние вторичных процессов на петрофизические свойства песчаной породы танопчинской свиты Тамбейского месторождения (Ямало-Ненецкий автономный округ) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 8. – С. 137–147. DOI: 10.18799/24131830/2024/8/4628

UDC 550.83+ 552.5 +553.98
DOI: 10.18799/24131830/2024/8/4628

Effect of secondary processes on the petrophysical properties of sand rock of the tanopchin formation of the Tambey field (Yamalo-Nenets autonomous okrug)

Yu.Yu. Zhdanova✉

National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

✉yym3@tpu.ru

Abstract. Relevance. Finding the correlation between filtration-capacitive properties and secondary processes helps to identify missed oil and gas deposits. Traditional methods of processing geophysical information are becoming less and less effective, and accordingly there is a need to introduce new techniques for detecting missed hydrocarbon deposits. **Aim.** To study the effect of secondary processes on the filtration and reservoir properties of rocks in the productive lower strata of the tanopchin formation of the North Tambey license area, located within the Tambey field, using materials from geophysical surveys of wells and core data. **Methods.** The statistical-correlation interpretation method represents a significant breakthrough in the field of interpretation of well logging data. It allows for a more accurate interpretation of data from existing reservoir studies, which makes it possible to identify productive sections of wells where hydrocarbons could not be detected by traditional methods. Statistical correlation interpretation is carried out on the basis of data from secondary geochemical processes occurring in the formation. **Scientific novelty.** Identification of the relationship between the intensity of secondary processes and the petrophysical properties of the rocks of the Lower Cretaceous productive horizon of the Tambey field (Yamalo-Nenets autonomous okrug). **Results and conclusions.** The author has determined the dependence of the filtration-capacitive properties of rocks on the intensity of secondary geochemical processes. It was established that secondary geochemical processes such as carbonatization and pyritization worsen reservoir properties, while kaolinization and pelitization lead to an improvement in the filtration and reservoir properties of reservoir rocks. The paper explains the mechanism of effect of secondary processes on filtration-capacitive properties. Pelitization of potassium feldspars leads to the formation of three-layer clay minerals, which have the largest sorption surface area and cation exchange capacity; as a result, the reservoir capacity increases, which leads to an increase in permeability several times.

Keywords: intensity of secondary processes, secondary kaolinitization, secondary pyritization, secondary carbonatization, secondary pelitization, hydrocarbons, statistical correlation interpretation, filtration and reservoir properties of rocks, North Tambey license area (Yamalo-Nenets autonomous okrug)

For citation: Zhdanova Yu.Yu. Effect of secondary processes on the petrophysical properties of sand rock of the tanopchin formation of the Tambey field (Yamalo-Nenets autonomous okrug). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 8, pp. 137–147. DOI: 10.18799/24131830/2024/8/4628

Введение

Традиционные способы обнаружения продуктивных пластов становятся всё менее эффективными, возникает необходимость в разработке и применении новых методик для обнаружения пропущенных залежей углеводородов [1, 2]. В этом контексте предложен метод статистически-корреляционной интерпретации (СКИ) данных геофизических исследований скважин (ГИС) для обнаружения углеводородов в пластах, который подробно рассмотрен в работах томского профессора И.А. Мельника [3]. Эта разработка позволяет обнаружить продуктивные пласты без необходимости проведения новых исследований кернового материала, вместо этого используя уже имеющиеся материалы потенциалов собственной поляризации

(СП), гамма-каротажа (ГК), нейтрон-нейтронного каротажа по тепловым нейтронам (ННКт), нейтронного гамма-каротажа (НГК) и кажущегося удельного электрического сопротивления (УЭС) [4]. Путем анализа этих данных определяются интенсивности вторичных процессов, таких как: каолинитизация, пелитизация, карбонатизация, пиритизация, а также статистический показатель двойного электрического слоя (ДЭС) в интересующем терригенном интервале. Следующим шагом определяются перспективные участки с низким УЭС и с учетом интенсивности вторичных процессов, влияющих на УЭС, ранжируются по уровню вероятной перспективности данных участков. После анализа результатов испытаний пластов в исследуемой зоне и сопоставления интенсивностей вторичных про-

цессов с характером насыщения определяются показатели, которые позволяют выявить залежи углеводородов, пропущенные при традиционной интерпретации данных геофизических исследований скважин. Новая технология позволяет более точно определять залежи углеводородов и оптимизировать процессы добычи.

Актуальность работы высока, поскольку выделение взаимосвязи между фильтрационно-емкостными свойствами (ФЕС) и вторичными процессами способствует выявлению упущенных залежей нефти и газа.

Цель работы – изучить влияние вторичных процессов на ФЕС пород нижней группы продуктивных пластов ТП₁₉₋₂₀ танопчинской свиты Северо-Тамбейского лицензионного участка.

В своей работе И.А. Никитин подтверждает валидность данного метода на основе интерпретации 50 скважин, заложенных на антиклинальной части Сургутского свода Ханты-Мансийского автономного округа [5]. Анализ с применением статистических методов позволил выявить параметр ДЭС, который указывает на статистическую интенсивность вторичных процессов.

В трудах И.А. Мельника представлено детальное изучение метода: он выявляет связь статистических и сейсмических данных; дает представление о распределении интенсивностей вторичных процессов в продуктивных юрских и меловых отложениях на территории Томской и Тюменской области [6].

Научной новизной работы является выявление связи интенсивности протекания вторичных процессов с петрофизическими свойствами пород танопчинской свиты Восточно-Ямальского подрайона Ямало-Гыданского района.

Объекты и методика исследования

Для определения влияния вторичных процессов на ФЕС пород была использована статистическо-корреляционная интерпретация на основе материалов ГИС старого фонда.

Статистическо-корреляционная интерпретация представляет собой инновационный подход к анализу геологических данных с целью обнаружения пропущенных низкоомных пластов на нефтегазовых месторождениях. В основе предлагаемого метода СКИ материалов ГИС лежит не усредненное (по интервалу) показание изменения величины одной каротажной диаграммы, а совокупно-синхронное, корреляционное изменение точечно-дискретного массива данных в исследуемом интервале двух каротажных диаграмм либо петрофизических данных. С помощью данного метода удастся установить статистическо-корреляционные регрессии, полученные в результате переинтерпрета-

ции стандартного комплекса ГИС между различными петрофизическими и геофизическими параметрами, изменения которых обусловлены соответствующими вторичными геохимическими процессами [7, 8].

Вторичные геохимические процессы играют ключевую роль в эволюции геологической среды и определении состава геологических пород. Под воздействием различных физических и химических факторов, таких как: высокие температуры и давление, воздействие флюидов, происходят реакции и превращения минеральных компонентов, что отражается в геологической структуре земной коры.

Статистическая интенсивность (i) вторичных процессов выражает как качественную (R^2), так и количественную (Y) меру регрессионных связей (1):

$$i=YR^2, \quad (1)$$

где Y – интервальный параметр, т. е. доля исследуемого интервала песчаной породы в скважине, в которой корреляционная связь между исследуемыми параметрами $|R|>0,6$; R – коэффициент корреляции [3].

Внедрение полученного уравнения значительно улучшает интерпретацию материалов ГИС и обеспечивает возможность определения интенсивности различных геохимических процессов по их корреляционным связям.

Для лучшего понимания сделаем остановку на ключевых идеях. Осадочный бассейн представляет собой замкнутую геологическую систему, в которой происходят процессы наложенного эпигенеза. Наложенный эпигенез связан с глубинной флюидомиграцией (с последующим геохимическим преобразованием породы) по разломам и трещинам литосферы, обусловленной тектоническими процессами, приводящими к трансформации геологических систем и подвергающими прилегающую площадь локальным изменениям [9]. Эти процессы возникают после накопления многокилометровых слоев разнообразных осадков и их превращения в осадочные породы под действием температуры и давления. В своих работах Б.А. Лебедев обсуждает вопрос о неизбежности проявления постседиментационных процессов, которые петрографически встречаются повсеместно [10].

Наложённые изменения вызываются внедрением агрессивных флюидов в породы из внешних источников. Зоны наложенного эпигенеза занимают секущее положение относительно напластования пород, что и позволяет их точно диагностировать. Потенциальные маршруты миграции углеводородов возможны при наличии субвертикальных и субгоризонтальных дислокаций [11, 12]. Данные выводы подчеркивают важность флюидодинамических факторов в формировании залежей углеводо-

родов. Интенсивность протекания тектонических процессов определяет возникновение динамически-ослабленных зон с последующей флюидомиграцией [13]. В результате возникают геохимические нарушения в природных системах и формируются зоны наложенного эпигенеза.

Изучение зависимостей проводилось на основе нижней группы продуктивных пластов ТП₁₉₋₂₀ танопчинской свиты Северо-Тамбейского участка.

Северо-Тамбейский лицензионный участок расположен в Ямало-Ненецком автономном округе (в 615 км от г. Салехарда) Российской Федерации. В 1982 г. было открыто Тамбейское месторождение, считающееся одним из крупнейших по запасам газа в России, в пределах которого и находится Северо-Тамбейский лицензионный участок. На Северо-Тамбейском лицензионном участке Тамбейского месторождения открыто 28 газовых и 19 газоконденсатных залежей.

Согласно тектоническому районированию, Северо-Тамбейская структура находится на северо-востоке Западно-Сибирской эпигерцинской плиты. Месторождение приурочено к Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции. Характеризуется наличием сложных литологически-экранированных и пластово-сводовых залежей [14, 15].

Продуктивные пласты залегают в нижней части танопчинской свиты, которая была сформирована в мелководно-морском бассейне, что отражается на его литологии, и представляет собой чередование алевроито-песчаного коллектора и глинистых пачек, которые выдержаны по разрезу и хорошо прослеживаются по площади [16]. Группа пластов ТП₁₉₋₂₀ подстилается глинами арктической пачки и перекрывается глинами нейтинской пачки [17].

На диаграммах ГИС пачка глин уверенно выделяется по низким значениям кажущегося сопротивления (до 2,3 Ом·м), высокой электропроводности (до 330 мСм/м), резкому увеличению диаметра скважины до 0,46 м, низким значениям (до 0,86 у.ед.) кривой НГК и положительной аномалии кривой ПС.

Согласно результатам ГИС, отложения, перекрывающие нижние продуктивные пласты танопчинской свиты, представлены глинами с положительной аномалией на кривой ПС и обладают повышенной радиоактивностью. Высокие значения кажущегося УЭС и низкие НГК указывают на то, что породы обогащены углефицированной растительной органикой, а также содержат прослой углей.

В разрезе нижней части танопчинской свиты выделяются несколько седиментационных циклов (ритмов) с увеличением гранулометрического состава пород снизу вверх и в целом отражают общее регрессивное строение разреза.

По литологическому составу разрез представлен чередованием глин, песчаников, алевролитов и карбонатных минералов. Глинистые породы однозначно выделяются по положительной аномалии кривой ПС, высоким значениям кривой ГК и низким значениям кажущегося сопротивления. На наличие карбонатных минералов указывает значительное увеличение сопротивления и высокие значения кривой НГК. Песчаные и песчано-алевритовые породы характеризуются на диаграммах ПС отрицательными амплитудами, на диаграммах ГК – пониженными значениями радиоактивности. Среднее значение коэффициента песчаности для пласта ТП₂₀ составляет 0,46 д. ед, для пласта ТП₁₉ – 0,47 д.ед.

Так, в скважине № 41, расположенной на юге участка, пласты представлены неравномерным линзовидным переслаиванием песчаного и глинистого материала. На севере участка в скважине № 140 литология пластов определена алевролитом серым, глинистым, тонкослоистым. В скважине № 212, в сводовой части центрального купола, породы представлены песчаником светло-серым, мелкозернистым, алевроитистым, с редкими прерывистыми слоями и скоплениями слюдисто-углистого состава.

Результаты исследования

На основе данных таблицы построена зависимость (2) коэффициента проницаемости от коэффициента пористости для нижней группы пластов танопчинской свиты:

$$K_{пр} = 0,0017 \exp^{57,712 \cdot K_p}, \quad (2)$$

где $K_{пр}$ – коэффициент проницаемости; K_p – коэффициент открытой пористости.

Полученные данные образцов пород позволили сделать вывод о том, что ФЕС распределены неравномерно. Подобные результаты получены в работах при исследовании группы пластов ТП₁₇₋₂₃ [18, 19]. Так, максимальные значения пористости достигают 0,17 д. ед. в сводовой части восточного купола в скважине № 137. В направлениях на запад и север значения параметра K_p уменьшаются (рис. 1).

Значения параметра $K_{пр}$ достигают максимальных отметок 13,5 мД в скважине № 130 и уменьшаются в направлениях на юго-запад и северо-запад (рис. 2).

Полученная зависимость позволила сделать вывод о том, что выделяется ряд образцов, имеющих повышенную проницаемость по отношению к низкой пористости, это говорит о том, что для этих скважин характерны трещиноватые разности, что является свидетельством протекания активных вторичных процессов, а именно пелитизации в ряде скважин (рис. 3).

Таблица. Значения для расчетов

Table. Values for calculations

№ скв. Well no.	Исследуемый интервал, м Study interval, m		Н, м/м	I _{каол} /I _{каол}	I _{карб} /I _{carb}	I _{пир} /I _{pyr}	I _{пел} /I _{pel}	K _п , д. ед. K _p , sub. un.	K _{пр} , мД K _{per} , mD
				у. ед./con. un.					
19	2560,0	2566,4	6,4	0,1068	0,2500	0,2353	0,1429	0,07	0,04
20	2590,0	2599,6	9,6	0,1050	0,1005	0,2800	0,1812	0,12	1,02
22	2586,0	2592,0	6,0	0,1776	0,1815	0,2667	0,1214	0,11	0,55
27	2544,2	2553,8	9,6	0,1732	0,1662	0,1600	0,1246	0,12	0,42
33	2532,0	2541,6	9,6	0,1027	0,2491	0,3000	0,1425	0,07	0,05
36	2588,0	2597,6	9,6	0,1597	0,2729	0,1800	0,1264	0,11	1,84
41	2576,0	2585,6	9,6	0,2418	0,0834	0,1200	0,3200	0,13	9,01
44	2586,0	2594,6	8,6	0,1118	0,3065	0,1333	0,1722	0,11	2,00
45	2551,4	2561,0	9,6	0,2623	0,0959	0,1200	0,3400	0,12	12,50
46	2564,6	2574,2	9,6	0,0675	0,2632	0,1600	0,2138	0,10	3,26
130	2537,2	2545,4	8,2	0,2100	0,0894	0,1300	0,3676	0,12	13,50
137	2530,0	2537,4	7,4	0,3267	0,1082	0,1224	0,3345	0,17	5,52
140	2582,2	2591,8	9,6	0,0842	0,2454	0,2619	0,1034	0,08	0,10
212	2517,4	2523,8	6,4	0,1249	0,2282	0,2200	0,1100	0,11	0,10

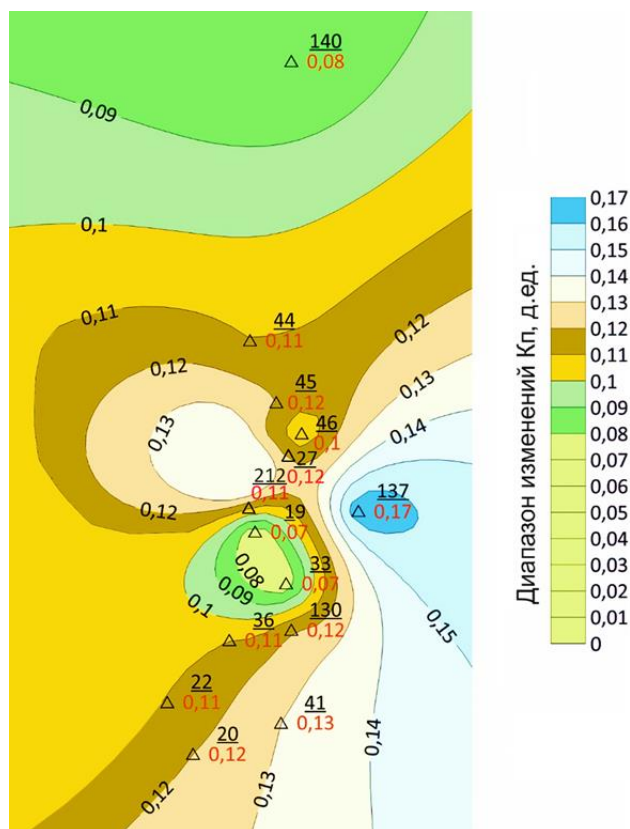


Рис. 1. Карта пористости нижней группы продуктивных пластов ТП₁₉₋₂₀ танопчинской свиты

Fig. 1. Porosity map of the lower group of productive strata TP₁₉₋₂₀ of the tanopchin formation

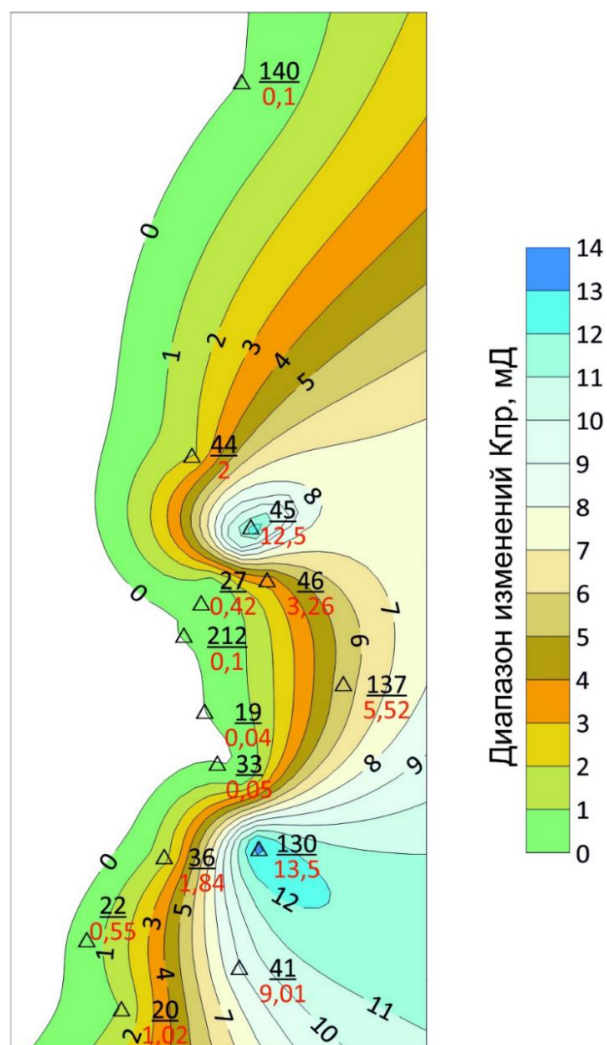


Рис. 2. Карта проницаемости нижней группы продуктивных пластов ТП₁₉₋₂₀ танопчинской свиты

Fig. 2. Permeability map of the lower group of productive strata TP₁₉₋₂₀ of the tanopchin formation

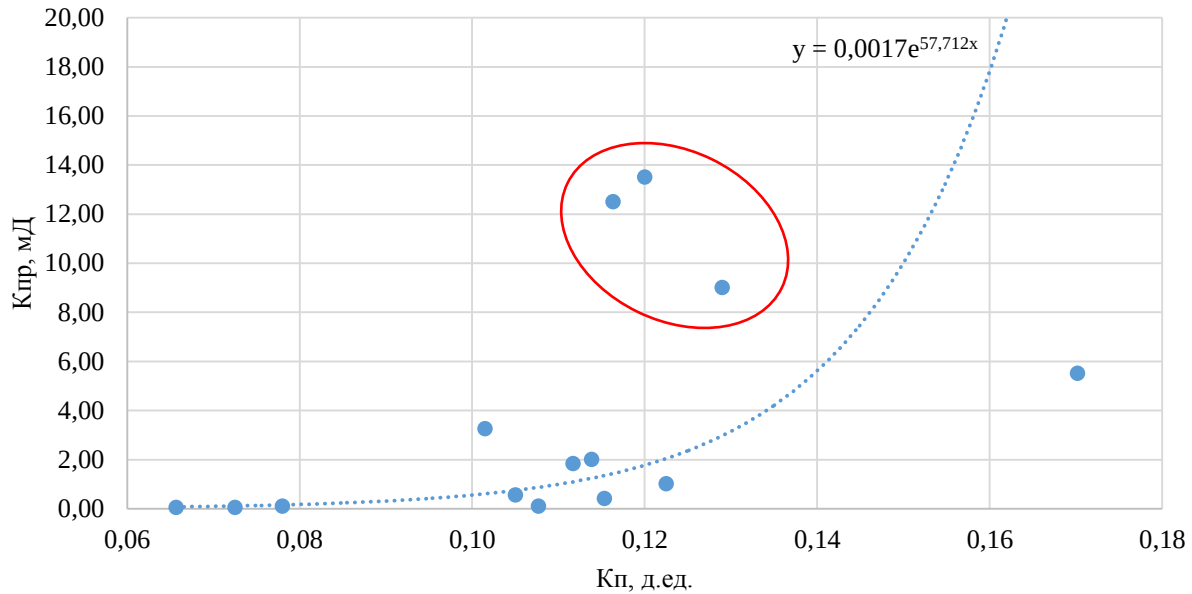


Рис. 3. Обобщенная зависимость фильтрационно-емкостных параметров нижней группы пластов ТП₁₉₋₂₀ танопчинской свиты
Fig. 3. Generalized dependence of filtration and reservoir parameters of the lower group of strata TP₁₉₋₂₀ of the tanopchin formation

Анализ полученных данных показал, что рост вторичных каолиновых фракций в составе песчаника однозначно положительно влияет на пористость и проницаемость пород (рис. 4). Каолинит, как продукт кислотной обстановки, развит в коллекторах практически повсеместно и является ключевым минералом реакции эпигенеза. Матрица породы растворяется в углекислой среде, образуются новые соединения, происходит реорганизация структуры породы. Углекислотный метасоматоз представляет собой подвид кислотного метасоматоза, при кото-

ром активатором выступает раствор, который образован путем насыщения воды углекислым газом – углекислотой (CO₂). Согласно Б.А. Лебедеву, углекислотный метасоматоз признается ключевым процессом, способствующим формированию эффективного порового пространства в осадочных породах [10]. Чем более интенсивно проявляется процесс выноса петрогенных компонентов из вмещающих пород, тем больший объем пустотного пространства образуется в данном участке горной породы, что, соответственно, приводит к увеличению ФЕС.

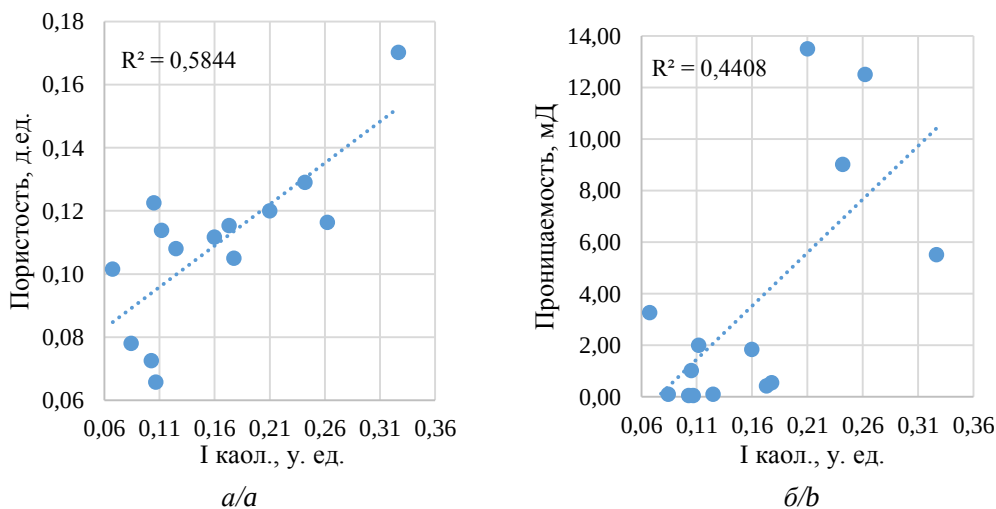


Рис. 4. График зависимости средних значений пористости (а) и проницаемости (б) от интенсивности каолинитизации нижней группы пластов ТП₁₉₋₂₀ танопчинской свиты
Fig. 4. Graph of the dependence of the average values of porosity (a) and permeability (b) on the intensity of kaolinitization of the lower group of strata TP₁₉₋₂₀ of the tanopchin formation

Анализ протекания в породе процесса пелитизации привел к выводу о том, что с ростом пелитизации увеличивается проницаемость, наблюдается высокая положительная корреляция (рис. 5).

В песчаных отложениях увеличение интенсивности карбонатизации вызывает ухудшение коллекторских свойств пород за счет отложения карбонатных материалов при резком падении давления и увеличении pH среды [20]. Интенсивность отложения в пустотах зависит от объемов вступающей в реакцию углекислоты, содержания алюмосилика-

тов и наличия первичного объема пустотно-порового пространства (рис. 6).

Влияние пиритизации на коллекторские свойства нижних пластов танопчинской свиты выражено активно: проницаемость и пористость уменьшаются, практически достигая 0. Пириты локализуются в наиболее проницаемых трещиноватых зонах обломочных пород, тем самым заполняя трещины, что приводит к их закупориванию. Поэтому пиритизацию можно относить к числу процессов, ухудшающих ФЕС коллекторов (рис. 7).

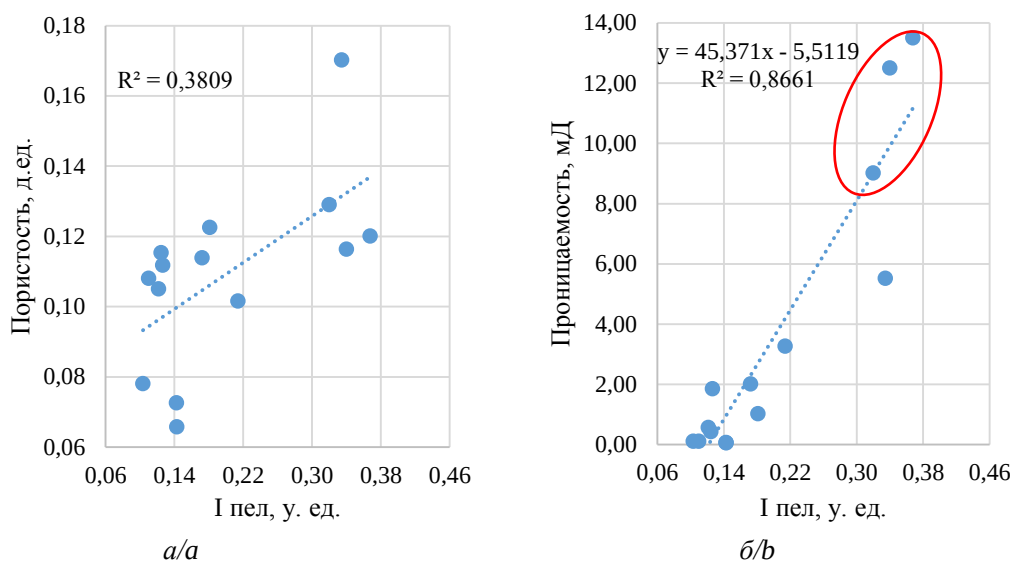


Рис. 5. График зависимости средних значений пористости (а) и проницаемости (б) от интенсивности пелитизации нижней группы пластов ТП₁₉₋₂₀ танопчинской свиты

Fig. 5. Graph of the dependence of the average values of porosity (a) and permeability (b) on the intensity of pelitization of the lower group of strata TP₁₉₋₂₀ of the tanopchin formation

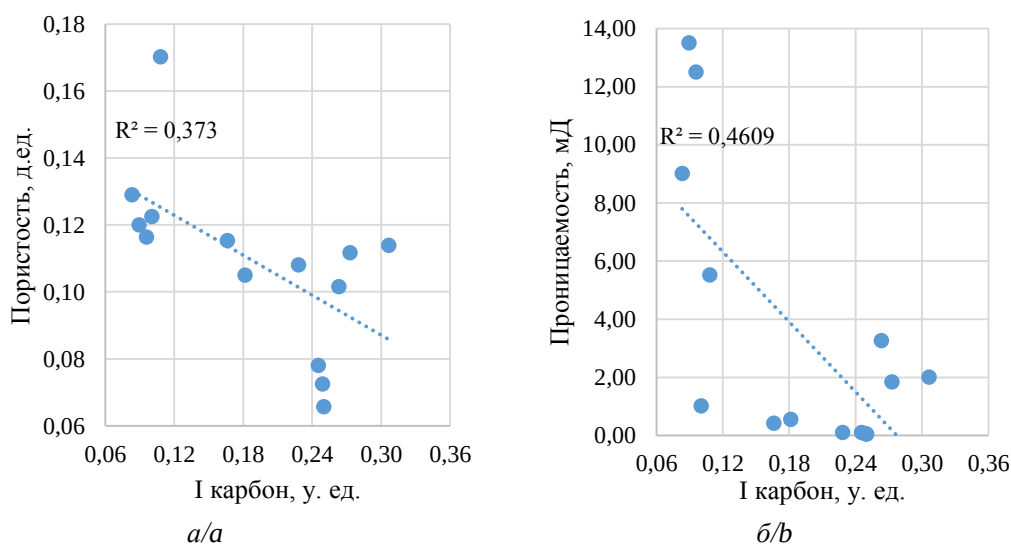


Рис. 6. График зависимости средних значений пористости (а) и проницаемости (б) от интенсивности карбонатизации нижней группы пластов ТП₁₉₋₂₀ танопчинской свиты

Fig. 6. Graph of the dependence of the average values of porosity (a) and permeability (b) on the intensity of carbonatization of the lower group of strata TP₁₉₋₂₀ of the tanopchin formation

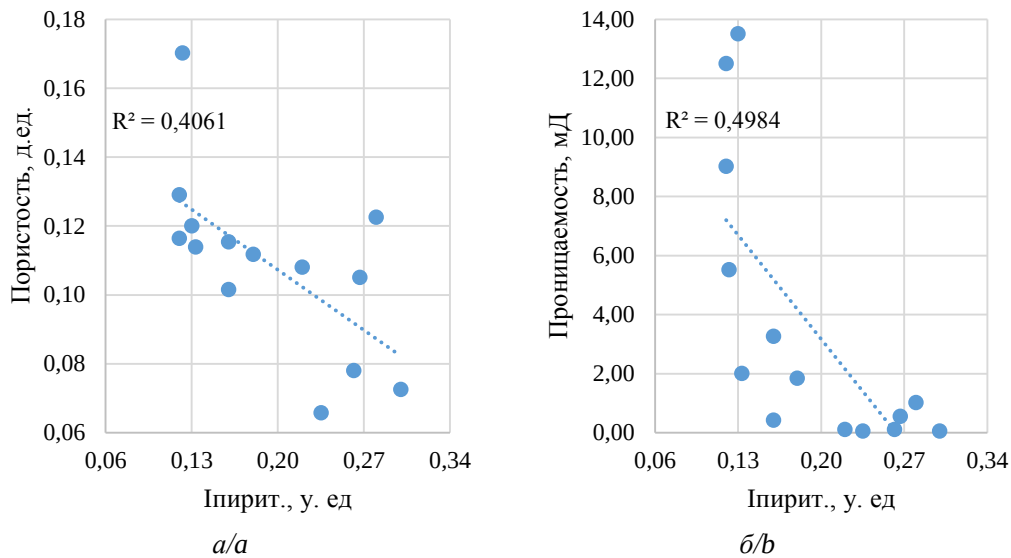


Рис. 7. График зависимости средних значений пористости (а) и проницаемости (б) от интенсивности пиритизации нижней группы пластов ТП₁₉₋₂₀ танопчинской свиты

Fig. 7. Graph of the dependence of the average values of porosity (a) and permeability (b) on the intensity of pyritization of the lower group of strata TP₁₉₋₂₀ of the tanopchin formation

Обсуждение результатов исследования

Процессы наложенного эпигенеза влияют не только на минеральный состав пород, но и на ФЕС породы. В процессе углекислотного метасоматоза может протекать каолинитизация глинистых минералов, а также полевых шпатов. Итогом повышения кислотности является растворение матрицы породы и пустотно-порового пространства, что в свою очередь приводит к прямо пропорциональной зависимости глинистости и пористости.

Каолинитизация протекает при углекислотном метасоматозе. Далее, после ошелачивания среды в процессе щелочного метасоматоза, в межпоровых фильтрационных каналах растворяется каолинит и с меньшей интенсивностью протекает процесс пелитизации. Щелочной метасоматоз приводит к пелитизации калиевого полевого шпата, что способствует образованию трехслойных глинистых минералов и выделению свободных ионов. В результате выдвигается гипотеза: гидролиз в слабощелочной среде приводит к последующему ошелачиванию породы и формированию смектитов, которые обладают наивысшей емкостью катионного обмена и площадью сорбционной поверхности. Вследствие уширения каналов фильтрации повышается емкость коллектора, что приводит к увеличению проницаемости в несколько раз.

Таким образом, наблюдается связь между вторичными процессами и ФЕС пород: вторичная пелитизация коррелирует с проницаемостью, а вторичная каолинитизация – с пористостью.

На основе полученных материалов подтверждено влияние вторичных процессов на петрофизиче-

ские свойства пород. За счет резкого падения давления и последующего увеличения рН пористой среды карбонаты выпадают в осадок, ухудшая тем самым коллекторские свойства: пористость и проницаемость. Иная ситуация происходит при вторичной каолинитизации. Чем более интенсивно проявляется процесс выноса компонентов матрицы из вмещающих пород, тем больший объем пустотного пространства образуется, соответственно, формируются дополнительные каналы фильтрации, что приводит к увеличению ФЕС.

Заключение

Результаты исследования влияния вторичных процессов на ФЕС пород позволили сделать следующие выводы.

- Анализ данных наложенного эпигенеза подтвердил, что вторичные геохимические процессы приводят к формированию различных минеральных новообразований и влияют на коллекторские свойства пород-коллекторов, тем самым разуплотняя или уплотняя их.
- Изучение процессов наложенного эпигенеза на Северо-Тамбейском лицензионном участке позволило установить, что карбонатизация и пиритизация – ухудшают коллекторские свойства, а каолинитизация и пелитизация ведут к улучшению коллекторских свойств пород.
- Выявлена разная степень развития процессов наложенного эпигенеза на участке. Так, отклонение трех точек на рис. 3 позволило предположить развитие пелитизации на участке недр.

- Объяснен механизм влияния вторичных процессов на ФЕС. Так, карбонатизация ухудшает коллекторские свойства при резком падении давления и последующем увеличении рН среды; каолинитизация проявляется за счет интенсивного выноса петрогенных компонентов и образования дополнительных каналов фильтрации, что ведет к увеличению ФЕС; увеличение интенсивности пиритизации приводит к ухудшению ФЕС пород вследствие заполнения пиритами трещиноватых зон обломочных пород.
- Выдвинута гипотеза о влиянии пелитизации на петрофизические свойства породы: пелитизация калиевых полевых шпатов приводит к увеличению емкости коллектора, что способствует увеличению проницаемости в несколько раз.

При выраженной высокой пористости проницаемость породы не всегда высока, соответственно, не всегда достигаются высокие значения ФЕС для продуктивного коллектора, поскольку решающую роль играет литология пластов, на формирование пород которых оказывают влияние вторичные процессы.

Понимание природы вторичных процессов, влияющих на ФЕС пород, является важным для оценки и прогнозирования эффективности коллекторов. Изучение этих процессов позволяет лучше понять, как изменения в породах могут влиять на проницаемость и пористость, что в свою очередь помогает оптимизировать процессы поиска и разведки породных ресурсов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Барашков С.В., Голубков Д.Е. Поиск пропущенных залежей: организация, реализация и результаты // Территория Нефтегаз. – 2017. – № 1–2 – С. 28–34.
2. Study on the origin and fluid identification of low-resistance gas reservoirs / Zhou Yuhui, Hu Qingxiong, Liu Wentao, Wu Zhiqi, Yan Yule, Ma Jialing // China. Yangtze University. – 2020. – Vol. 9. – № 2. – P. 183–196. DOI: 10.1007/s12665-017-7218-0. URL: <https://www.hindawi.com/journals/geofluids/2020/8859309/> (дата обращения 15.10.2023)
3. Мельник И.А. Основы статистически-корреляционной интерпретации материалов геофизических исследований скважин. – М: Изд-во «РУСАЙНС», 2022. – 76 с.
4. Liu H. Principles and applications of well logging. – Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2017. – 356 с. DOI: 10.1007/978-3-662-53383-3. URL: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-662-53383-3#back-to-top> (дата обращения 15.10.2023).
5. Никитин И.А. Обоснование и предпосылки выделения низкоомных коллекторов как инструмент поиска пропущенных залежей на примере месторождения Сургутского свода (ХМАО) // Проблемы геологии и освоения недр: труды XXV Международного симпозиума имени академика М.А. Усова студентов и молодых учёных, посвященного 120-летию горно-геологического образования в Сибири, 125-летию со дня основания Томского политехнического университета. – Томск, 5–9 апреля 202. В 2 т. – Томск: Изд-во ТПУ, 2021. – Т. 1. – С. 213–215.
6. Мельник И.А. Интенсивности процессов наложенного эпигенеза как индикаторы нефтенасыщенности песчаных коллекторов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330. – № 6. – С. 90–97.
7. Мельник И.А., Жданова Ю.Ю., Сидоренко Н.С. Применение метода статистически-корреляционной интерпретации данных ГИС на месторождении Самотлор // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2023. – Т. 334. – № 9. – С. 104–114.
8. Жданова Ю.Ю. Апробация результатов метода статистическо-корреляционной интерпретации данных геофизических исследований скважин на Самотлорском месторождении // Новейшие технологии освоения месторождений углеводородного сырья и обеспечение безопасности экосистем Каспийского шельфа: материалы XIV Международной научно-практической конференции. – Астрахань, 11–12 октября 2023. – Астрахань: Изд-во АГТУ, 2023. – С. 153–157.
9. Vinogradov V.I. Some features of epigenesis based on isotope geochemistry // Lithology and Mineral Resources. – 2003. – Vol. 38. – P. 332–349. DOI: 10.1023/A:1024611729794.
10. Лебедев Б.А. Геохимия эпигенетических процессов в осадочных бассейнах. – Л.: Недра, 1992. – 239 с.
11. The role of fluid migration system in hydrocarbon accumulation in Maichen Sag, Beibuwan Basin / H. Liu, J. Yang, F. Wu, W. Chen, Q. Liu // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – IOP Publishing, 2018. – Vol. 121. – № 5. – 9 p. DOI: 10.1088/1755-1315/121/5/052048. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/121/5/052048/meta> (дата обращения 15.10.2023).
12. Fault controls on hydrocarbon migration – an example from the Southwestern Pearl River mouth basin / B. Xu, J.M. Miocic, Y. Cheng, L. Xu, S. Ma, W. Sun, Y. Chu, Z. Wu // Applied Sciences. – 2024. – Vol. 14. – № 5. – 20 p. DOI: 10.3390/app14051712. URL: <https://www.mdpi.com/2076-3417/14/5/1712> (дата обращения 26.11.2023).
13. Impact and implications of hydrothermal fluids migration in the Frolov hydrocarbon province in West Siberia / D. Gafurova, A. Maltseva, A. Kalmykov, A. Mazzini, N. Balushkina, E. Karpova, A. Khotylev, M. Latypova, M. Fomina, E. Manuilova, J. Kotochkova, D. Ivanova, V. Churkina, G. Kalmykov // Marine and Petroleum Geology. – 2024. – Vol. 164. – 16 p. DOI: 10.1016/j.marpetgeo.2024.106826 URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0264817224001387> (дата обращения 26.11.2023).
14. Filippova J., Mezentsev D. Integrated reservoir fluid characterization: a case study of multilayered Yuzhno-Tambeyskoe gas condensate field // SPE Russian Petroleum Technology Conference. – SPE, 2012. – P. 1945–1960. DOI: 10.2118/162022-MS URL: https://www.researchgate.net/publication/266665608_Integrated_Reservoir_Fluid_Characterization_A_Case_Study_of_Multilayered_Yuzhno-Tambeyskoe_Gas_Condensate_Field_Russian (дата обращения 26.11.2023).

15. Фурсенко Е.А., Бурухина А.И. Геохимия нефтей и конденсатов месторождений Тамбейской группы (полуостров Ямал, Западная Сибирь) // Химия в интересах устойчивого развития. – 2021. – Т. 29. – № 4. – С. 495–510. DOI: 10.15372/CSD2021327.
16. Genetic types of deposits of the tanopchinsky suite / V.V. Saltykov, A.S. Nikiforov, T.M. Vazhenina, E.L. Rzhetskaja // Periódico Tchê Química. – 2018. – Vol. 15. – P. 548–561.
17. Особенности корреляции и индексации отложений танопчинской свиты на месторождениях полуострова Ямал / Н.В. Санькова, А.А. Дорошенко, В.В. Мазуркевич, А.В. Романов // Науки о земле. Современное состояние: материалы IV Всероссийской молодежной научно-практической школы-конференции. – Шира, Хакасия, 31 июля 2017. – Новосибирск: Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, 2017. – С. 20–22.
18. Статистический и площадной анализ фильтрационно-емкостных свойств коллекторов танопчинской свиты Тамбейского нефтегазоконденсатного месторождения, определенных на образцах керна / Е.Е. Поляков, И.В. Чурикова, А.В. Чичмарёва, Н.А. Махонина, Т.Н. Малютина, Е.А. Оглова // Вести газовой науки. – 2021. – С. 178–191. URL: <http://vesti-gas.ru/sites/default/files/attachments/3-48-2021-178-191.pdf> (дата обращения: 26.11.2023).
19. Сухих А.О., Афонин И.В. Условия формирования танопчинской свиты (Северо-Тамбейское месторождение, Западная Сибирь) // Динамика и взаимодействие геосфер Земли: материалы Всероссийской конференции с международным участием, посвященной 100-летию подготовки в Томском государственном университете специалистов в области наук о Земле. – Томск, 8–12 ноября 2021. – Томск: Изд-во Томского государственного университета, 2021. – Т. 1. – С. 222–224.
20. Коновальцева Е.С. Вторичные процессы в породах-коллекторах продуктивных отложений Ярактинского месторождения // Нефтегазовая геология. Теория и практика. – 2010. – Т. 5. – № 1. URL: http://www.ngtp.ru/rub/2/18_2010.pdf (дата обращения: 15.12.23)

Информация об авторах

Юлия Юрьевна Жданова, аспирант, отделение геологии, инженерная школа природных ресурсов, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30; uym3@tpu.ru

Поступила в редакцию: 25.03.2024

Поступила после рецензирования: 16.05.2024

Принята к публикации: 31.05.2024

REFERENCES

1. Barashkov S. V., Golubkov D. E. Search for missed deposits: organization, implementation and results. *Territory Neftgaz*, 2017, no. 1–2, pp. 28–34. (In Russ.)
2. Zhou Yuhui, Hu Qingxiong, Liu Wentao, Wu Zhiqi, Yan Yule, Ma Jialing. Study on the origin and fluid identification of low-resistance gas reservoirs. *China. Yangtze University*, 2020, vol. 9, no. 2, pp. 183–196. DOI:10.1007/s12665-017-7218-0. Available at: <https://www.hindawi.com/journals/geofluids/2020/8859309/> (accessed 15 October 2023).
3. Melnik I.A. *Fundamentals of statistical-correlation interpretation of materials from geophysical well research*. Moscow, RUSAINS Publ. house, 2022. 76 p. (In Russ.)
4. Liu H. *Principles and applications of well logging*. Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg, 2017. 356 p. DOI: 10.1007/978-3-662-53383-3. Available at: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-662-53383-3#back-to-top> (accessed 15 October 2023).
5. Nikitin I.A. Justification and prerequisites for identifying low-resistivity reservoirs as a tool for searching for missed deposits using the example of the Surgut arch field (KhMAD). *Problems of geology and subsoil development. Proc. of the XXV International Symposium named after Academician M.A. Usov of students and young scientists, dedicated to the 120th anniversary of mining and geological education in Siberia, the 125th anniversary of the founding of Tomsk Polytechnic University*. Tomsk, April 5–9, 2021. Tomsk, TPU Publ. House, 2021. pp. 213–215. (In Russ.)
6. Melnik I.A. Intensities of superimposed epigenesis as indicators of oil saturation in sandstone reservoirs. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 6, pp. 90–97. (In Russ.)
7. Melnik I.A., Zhdanova Yu.Yu., Sidorenko N.S. Application of the method of statistical-correlation interpretation of QWS data in the Samotlor field. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2023, vol. 334, no. 9, pp. 104–114. (In Russ.)
8. Zhdanova Yu.Yu. Approbation of the results of the method of statistical-correlation assessment of geophysical survey data of wells at the Samotlor field. *Latest technologies for the development of hydrocarbon source fields and ensuring the safety of the ecosystem of the Caspian shelf. Materials of the XIV International Scientific and Practical Conference*. Astrakhan, October 11–12 2023. Astrakhan, ASTU Publ. House, 2023. pp. 153–157.
9. Vinogradov V.I. Some features of epigenesis based on isotope geochemistry. *Lithology and Mineral Resources*, 2003, vol. 38, pp. 332–349. DOI: 10.1023/A:1024611729794.
10. Lebedev B.A. *Geochemistry of epigenetic processes in sedimentary basins*. Leningrad, Nedra Publ., 1992. 239 p. (In Russ.)
11. Liu H., Yang J., Wu F., Chen W., Liu Q. The role of fluid migration system in hydrocarbon accumulation in Maichen Sag, Beibuwan Basin. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing*, 2018, vol. 121, no. 5, 9 p. DOI: 10.1088/1755-1315/121/5/052048. Available at: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/121/5/052048/meta> (accessed 15 October 2023).

12. Xu B., Miodic J.M., Cheng Y., Xu L., Ma S., Sun W., Chu Y., Wu Z. Fault controls on hydrocarbon migration – an example from the Southwestern Pearl River mouth basin. *Applied Sciences*, 2024, vol. 14, no. 5, 20 p. DOI: 10.3390/app14051712. Available at: <https://www.mdpi.com/2076-3417/14/5/1712> (accessed 26 November 2023).
13. Gafurova D., Maltseva A., Kalmykov A., Mazzini A., Balushkina N., Karpova E., Khotylev A., Latypova M., Fomina M., Manuilova E., Kotochkova J., Ivanova D., Churkina V., Kalmykov G. Impact and implications of hydrothermal fluids migration in the Frolov hydrocarbon province in West Siberia. *Marine and Petroleum Geology*, 2024, vol. 164, 16 p. DOI: 10.1016/j.marpetgeo.2024.106826 Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0264817224001387> (accessed 26 November 2023).
14. Filippova J., Mezentshev D. Integrated reservoir fluid characterization: a case study of multilayered Yuzhno-Tambeyskoe gas condensate field. *SPE Russian Petroleum Technology Conference*, 2012, October, pp 1–5. DOI: 10.2118/162022-MS Available at: https://www.researchgate.net/publication/266665608_Integrated_Reservoir_Fluid_Characterization_A_Case_Study_of_Multilayered_Yuzhno-Tambeyskoe_Gas_Condensate_Field-Russian (accessed 26 November 2023).
15. Fursenko E.A., Burukhina A.I. Geochemistry of oils and condensates of fields of the Tambey group (Yamal Peninsula, Western Siberia). *Chemistry for sustainable development*, 2021, vol. 29, no. 4, pp. 507–522. (In Russ.) DOI: 10.15372/CSD2021327.
16. Saltykov V.V., Nikiforov A.S., Vazhenina T.M., Rzhetskaja E.L. Genetic types of deposits of the tanopchinsky suite. *Periódico Tchê Química*, 2018, vol. 15, pp. 548–561.
17. Sankova N.V., Doroshenko A.A., Mazurkevich V.V., Romanov A.V. Features of correlation and indexation of sediments of the tanopchin formation in the fields of the Yamal Peninsula. *Earth Sciences. Current state: materials of the IV All-Russian Youth Scientific and Practical School-Conference*. Shira, Khakassia, July 31, 2017. Novosibirsk, Novosibirsk National Research State University Publ., 2017. pp. 20–22. (In Russ.)
18. Polyakov E.E., Churikova I.V., Chichmareva A.V., Makhonina N.A., Malyutina T.N., Oglova E.A. Statistical and areal analysis of core data on porosity and permeability of tanopchin series reservoirs at Tambey oil-gas-condensate field. *Lead gas science*, 2021, pp. 178–191. (In Russ.) Available at: <http://vesti-gas.ru/sites/default/files/attachments/3-48-2021-178-191.pdf> (accessed 26 November 2023).
19. Sukhikh A.O., Afonin I.V. Conditions for the formation of the tanopchinskaya formation (North-Tambeyskoe field, Western Siberia). *Dynamics and interaction of the Earth's geospheres. Materials of the All-Russian conference with international participation, dedicated to the 100th anniversary of training specialists in the field of Earth sciences*. Tomsk, 8–12 November 2021. Tomsk: Tomsk State University Publ. house, 2021. Vol. 1, pp. 222–224. (In Russ.)
20. Konovaltseva E.S. Secondary processes in reservoir rocks of productive deposits of the Yarakta field. *Oil and Gas Geology. Theory and practice*, 2010, vol. 5, no. 1. (In Russ.) Available at: http://www.ngtp.ru/rub/2/18_2010.pdf (accessed: 15 December 2023).

Information about the authors

Yulia Yu. Zhdanova, Postgraduate Student, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation; yym3@tpu.ru

Received: 25.03.2024

Revised: 16.05.2024

Accepted: 31.05.2024

УДК 551.24.02:551.24.057
DOI: 10.18799/24131830/2024/8/4431
Шифр специальности ВАК: 1.6.9

Геотектоническая модель глубинного строения Змеиногорского рудного района Рудного Алтая по данным геологической интерпретации комплекса геофизических съемок

А.С. Егоров, Д.Ф. Калинин, Д.Д. Секерина✉

Санкт-Петербургский горный университет, Россия, г. Санкт-Петербург

✉sekerinadar@mail.ru

Аннотация. *Актуальность* исследования глубинного строения Змеиногорского рудного района обусловлена поисками скрытого и слабо проявленного на поверхности колчеданно-полиметаллического оруденения в пределах рудноалтайской минерагенической зоны. Эта задача представляет особый прогностический интерес в связи с высокой опойскаванностью района на поверхности и перспективами обнаружения скрытого оруденения на более глубоких горизонтах. *Цель:* геотектоническое моделирование структурно-вещественных неоднородностей земной коры Змеиногорского рудного района на основе комплексной интерпретации геолого-геофизических данных с выявлением закономерностей локализации скрытого и слабо проявленного на поверхности колчеданно-полиметаллического оруденения. *Объекты:* закономерности локализации скрытого и слабо проявленного на поверхности колчеданно-полиметаллического оруденения в пределах Змеиногорского рудного района Рудного Алтая. *Методы:* обработка площадных и профильных материалов изученности Рудного Алтая, качественная и количественная интерпретация разнородной геолого-геофизической информации на региональном и детальном уровнях. Изучение истории развития и геодинамических обстановок формирования рудоносных структур Змеиногорского рудного района с выявлением геолого-структурных прогностических признаков на глубинах, представляющих практический интерес. *Результаты.* На основе комплексного анализа разнородных геолого-геофизических данных выполнена историко-эволюционная и геодинамическая интерпретация минерагенических структур Змеиногорского рудного района в пределах Рудного Алтая; эти материалы могут быть положены в основу региональных прогнозных построений с использованием нестандартных геолого-структурных и вещественных (тектонических) признаков; верифицировано особое влияние тектонических событий, характеризующих обстановку активной континентальной окраины с осложняющими эпизодами рифтогенеза; выявлены закономерности локализации колчеданно-полиметаллических руд в вулканогенно-осадочных породах с обоснованием комплекса прогнозных критериев.

Ключевые слова: геофизические поля, геотектоническая модель, Змеиногорский рудный район Рудного Алтая, скрытое оруденение, полиметаллы

Для цитирования: Егоров А.С., Калинин Д.Ф., Секерина Д.Д. Геотектоническая модель глубинного строения Змеиногорского рудного района Рудного Алтая по данным геологической интерпретации комплекса геофизических съемок // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 8. – С. 148–160. DOI: 10.18799/24131830/2024/8/4431

UDC 551.24.02:551.24.057
DOI: 10.18799/24131830/2024/8/4431

Geotectonic model of the deep structure of the Zmeinogorsky ore district of Rudny Altai according to geological interpretation of geophysical survey complex

A.S. Egorov, D.F. Kalinin, D.D. Sekerina✉

Saint Petersburg Mining University, St. Petersburg, Russian Federation

✉sekerinadar@mail.ru

Abstract. Relevance. The search for hidden and poorly manifested pyrite-polymetallic mineralization on the surface within the Rudny Altai minerogenic zone. This task is of particular prognostic interest due to the high searchability of the area on the surface and the prospects for detecting hidden mineralization at deeper horizons. **Aim.** Geotectonic modeling of structural and material inhomogeneities of the Earth's crust of the Zmeinogorsky ore district based on a comprehensive interpretation of geological and geophysical data with the identification of patterns of localization of hidden and poorly manifested pyrite-polymetallic mineralization on the surface. **Objects.** Regularities of localization of hidden and poorly manifested pyrite-polymetallic mineralization on the surface within the Zmeinogorsky ore district of the Rudny Altai. **Methods.** Processing of areal and profile materials of the study of the Rudny Altai, qualitative and quantitative interpretation of heterogeneous geological and geophysical information at the regional and detailed levels. The study of the history of development and geodynamic conditions of the formation of ore-bearing structures of the Zmeinogorsky ore district with the identification of geological and structural prognostic features at depths of practical interest. **Results.** Based on a comprehensive analysis of heterogeneous geological and geophysical data, the authors have carried out the historical-evolutionary and geodynamic interpretation of the mineragenic structures of the Zmeinogorsky ore district within the Rudny Altai; these materials can be used as the basis for regional forecast constructions using non-standard geological, structural and material (tectonic) signs; the special influence of tectonic events characterizing the situation of the active continental margin with complicating episodes of rifting was verified; the patterns of localization of pyrite-polymetallic ores in volcanogenic-sedimentary rocks were revealed with the justification of a set of predictive criteria.

Keywords: geophysical fields, geotectonic model, Zmeinogorsky ore district of the Rudny Altai, hidden mineralization, polymetals

For citation: Egorov A.S., Kalinin D.F., Sekerina D.D. Geotectonic model of the deep structure of the Zmeinogorsky ore district of Rudny Altai according to geological interpretation of geophysical survey complex. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 8, pp. 148–160. DOI: 10.18799/24131830/2024/8/4431

Введение

В условиях наращивания минерально-сырьевой базы за счет скрытого и слабо проявленного на поверхности колчеданно-полиметаллического оруденения Змеиногорский район Рудного Алтая представляет большой прогностический интерес [1]. Район обладает богатыми запасами объектов рассматриваемого типа, что предопределяет необходимость разработки глубинной геолого-структурной (геотектонической) модели формирования Змеиногорского рудного района, обеспечивающей оценку глубинного источника оруденения, механизмов мобилизации, переноса и локализации рудного вещества. Особое внимание уделяется тектонической позиции исследуемого региона в пределах каледонских и герцинских орогенных структур [2].

Для реализации этой задачи привлекается широкий комплекс разнородной геолого-геофизической информации. Согласно мировой классификации минерагенические объекты Алтайского региона относятся к категории вулканогенно-осадочных массивных сульфидных месторождений [3], именуемых в зарубежных источниках как «VMS-тип» [4, 5]. На основе изучения отечественного и зарубежного опыта [6] месторождений данного типа, говорится, что они формируются в условиях рифтогенеза и характеризуются бимодальными последовательностями вулканогенно-осадочных формаций [7].

Рассматривая закономерности формирования колчеданно-полиметаллических месторождений Рудного Алтая, следует отметить их пространственно-генетическую связь с процессами рифто-

генеза ранне-среднедевонской активной континентальной окраины [8]. В ходе рифтогенного растяжения в раннем-среднем девоне была заложена Змеиногорско-Быструшинская вулканическая депрессия (прогиб), вмещающая рудные толщи [9]. Наиболее крупные месторождения приурочены к среднедевонским структурам задугового рифтогенеза, локализованным вблизи Северо-Восточного разлома. В позднем девоне-раннем карбоне депрессия попала во фланговую зону складчатонадвиговых дислокаций герцинского коллизионного орогенеза, обусловленного аккрецией Сибирской и Казахстанской плит. Это привело к существенной деформации этой вулканической депрессии. Пограничной структурой ареала развития герцинского орогенеза, проявившегося на фоне более древнего каледонского фундамента, ранее представлялся вышеупомянутый Северо-Восточный разлом [10, 11].

В последние десятилетия широко дискутируется вопрос о причинах многообразия полиметаллических руд Рудноалтайской минерагенической зоны [12]. По мнению многих авторов, высокая концентрация колчеданных руд и особенности морфологии рудных тел указывают на их образование в условиях восходящей ритмично-пульсационной гидротермальной системы с единым источником рудного вещества [13]. В ряде исследований авторы приходят к выводу о многоярусном расположении рудовмещающих горизонтов в пределах наиболее крупных месторождений Рудноалтайского пояса [14]. Таким образом, основная идея формирования колчеданно-полиметаллических руд

связана с наличием источника тепла, который запускает крупномасштабные конвекционные процессы в астеносфере и обеспечивает мобилизацию и перенос флюидов вдоль магматоподводящих глубинных разломов.

В большинстве источников процессы рудогенеза приурочены к вулканогенной депрессии, выполненной вулканогенно-осадочными породами. Интрузивные комплексы оказывают влияние на формирование зон потенциальной локализации скрытого колчеданно-полиметаллического оруденения [15].

Дискуссионность механизмов рудоформирования Змеиногорского рудного района Рудного Алтая предопределяет необходимость исследования глубинного строения региона с углубленной геотектонической интерпретацией разнородных геолого-геофизических материалов. Для этого нами была поставлена задача систематизации разрозненных геолого-геофизических данных, их последующая обработка и комплексная интерпретация. В ходе этих исследований выполнено геолого-геофизическое моделирование рудного района, проведена оценка вещественных и морфологических параметров главных структурно-вещественных подразделений, намечены механизмы рудоформирования колчеданно-полиметаллических месторождений [16], которые в дальнейшем будут использованы для обоснования геолого-структурных критериев скрытого и слабопроявленного на поверхности колче-

данно-полиметаллического оруденения и выполнения прогнозно-минерагенических построений с использованием алгоритмов распознавания образов.

Фактологическая основа

В качестве фактологической основы исследования авторами задействованы геологические, тектонические, дистанционные карты и цифровые матрицы гравитационного и магнитного полей в масштабах 1:1000000–1:25000 [15]. Профильные материалы представлены региональными данными глубинного сейсмического зондирования и крупномасштабными сейсмическими разрезами МОГТ-2Д Змеиногорского рудного района [8]. Результаты предшествующих исследований данного района представлены в производственных отчетах и научных публикациях [17]. Ранее выполненные авторами мелкомасштабные геолого-геофизические построения этого региона задействованы для оценки последовательности проявления тектонических событий, определивших особенности локализации оруденения Змеиногорского рудного района [2].

Методология исследования

Технологическая схема геолого-геофизического моделирования Змеиногорского рудного района представлена на рис. 1. Она включает четыре основных этапа: создание базы данных, обработку, интерпретацию и решение прогнозных задач.

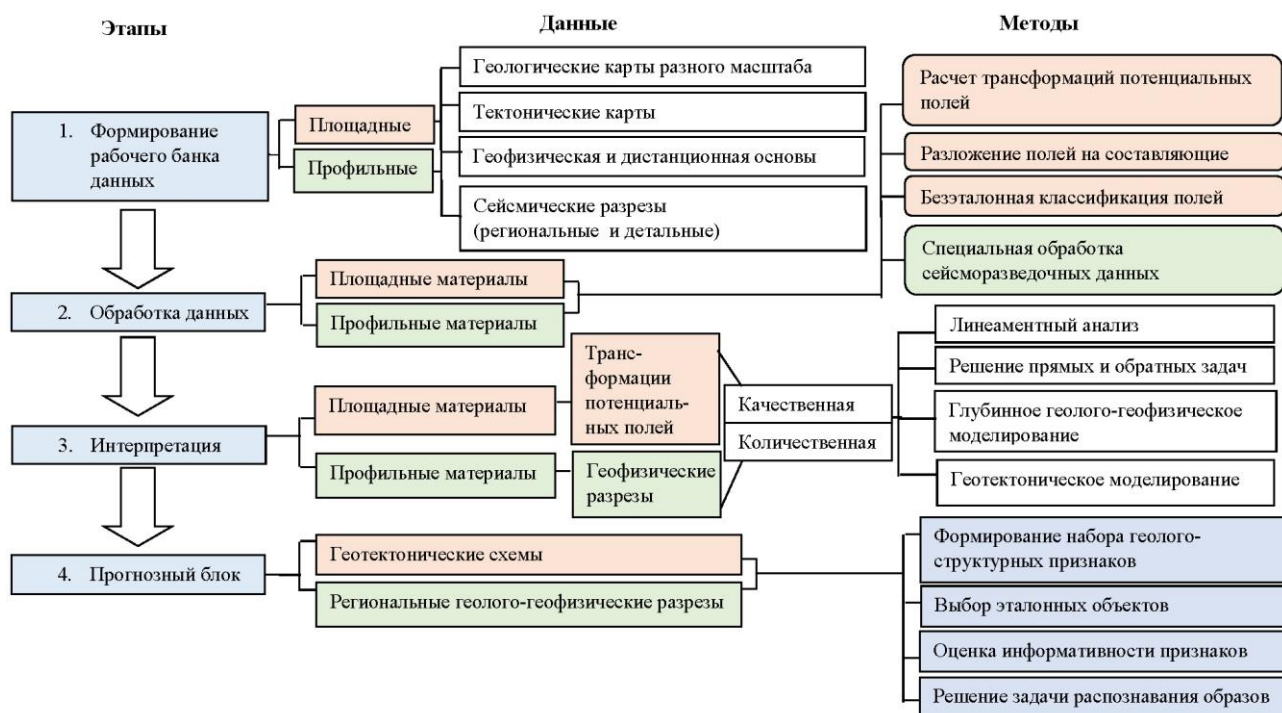


Рис. 1. Этапы обработки и интерпретации разнородных геолого-геофизических данных в пределах Змеиногорского рудного района (Рудный Алтай) [составлено авторами]

Fig. 1. Stages of processing and interpretation of heterogeneous geological and geophysical data within the Zmeinogorsk ore district (Rudny Altai) [compiled by the authors]

Формирование рабочего банка данных

На первом этапе выполняется систематизация разрозненной геолого-геофизической информации в составе рабочего банка данных (БД). В ходе его формирования проводится согласование условных обозначений и координатная привязка геологических и геофизических данных, как по площади рудного района, так и в сечениях опорных геофизических профилей.

Обработка данных

На втором этапе исследований выполнена обработка данных площадных и профильных геофизических съемок:

- расчет трансформант потенциальных полей (производные полей, искусственный псевдорельеф, высоко- и низкочастотная фильтрация и т. д.) [18, 19];
- разложение полей на локальную и региональную составляющие с использованием спектрального разложения на основе рядов Фурье [20] (рис. 2);
- безэталонная классификация исходных и преобразованных данных с использованием алгоритмов комплексной обработки, реализованных в отечественном программном обеспечении КОСКАД 3D [21] и др.

При обработке профильных сейсмических данных задействован алгоритм расчета сейсмического разреза в показателях «рефлективности» (рис. 3, а, б) [23, 24]. В скользящем окне по растровым представлениям глубинных и временных сейсмических разрезов ГСЗ и МОГТ-2Д-ВРС рассчитывается число меток сейсмических границ (или рефлекторов разрезов МОВ); результаты расчетов представляются в форме изолиний [8]. В общем случае на таких моделях удастся наметить положение блоков с корой континентального типа и межблоковых (сутурных) зон [25, 26].

Интерпретация данных

Геотектоническая интерпретация комплекса геолого-геофизических и дистанционных данных является важнейшим результатом исследований глубинного строения Змеиногорского рудного района (рис. 4).

При построении результирующей геотектонической схемы нами выделены разрывные нарушения, дифференцируемые по рангу и морфокинематическому типу, а также контуры основных структурно-вещественных подразделений площади исследований, включая раннедевонские шельфовые комплексы, рифтогенные интрузивные и эффузивные комплексы разного состава, а также молодые постколлизийные интрузивы.

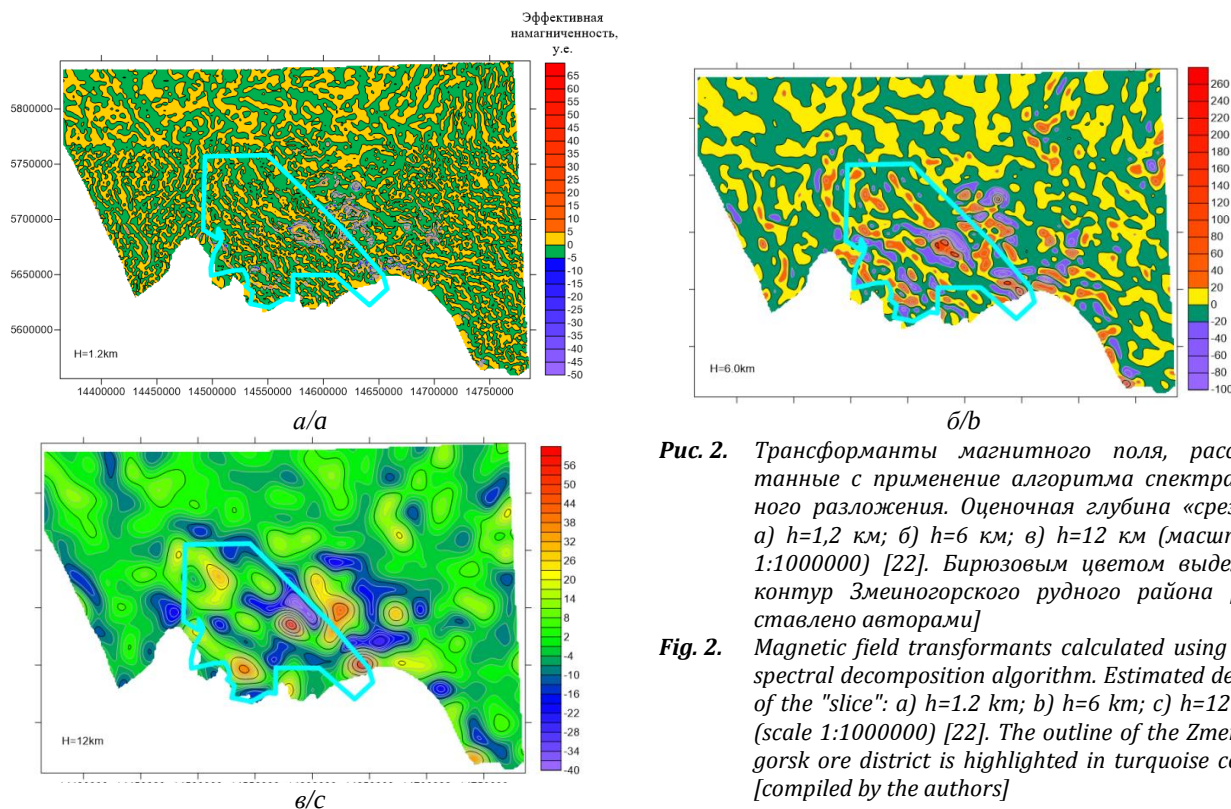


Рис. 2. Трансформанты магнитного поля, рассчитанные с применением алгоритма спектрального разложения. Оценочная глубина «среза»: а) $h=1,2$ км; б) $h=6$ км; в) $h=12$ км (масштаб 1:1000000) [22]. Бирюзовым цветом выделен контур Змеиногорского рудного района [составлено авторами]

Fig. 2. Magnetic field transformants calculated using the spectral decomposition algorithm. Estimated depth of the "slice": а) $h=1.2$ km; б) $h=6$ km; в) $h=12$ km (scale 1:1000000) [22]. The outline of the Zmeinogorsk ore district is highlighted in turquoise color [compiled by the authors]

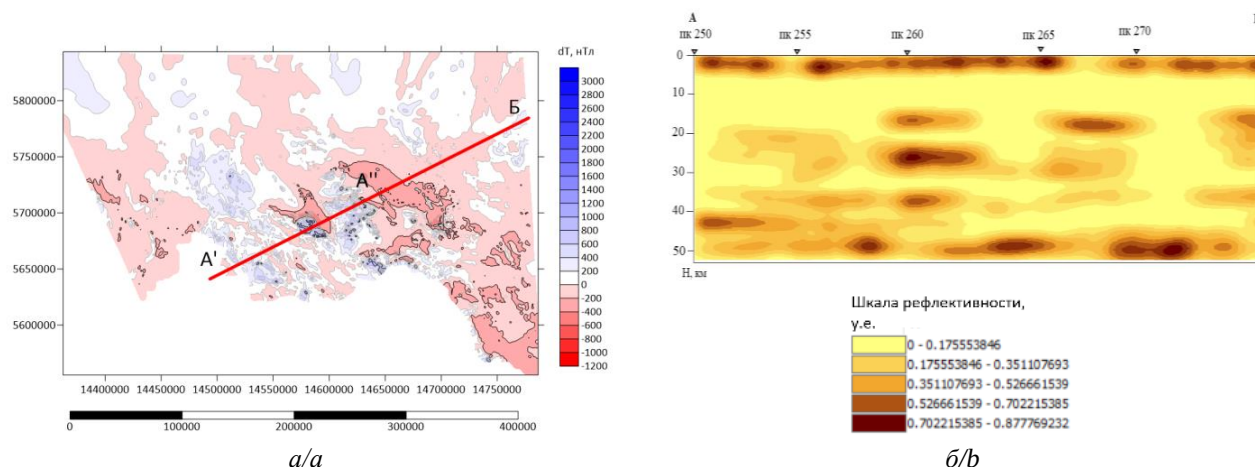


Рис. 3. Положение фрагмента регионального профиля ГСЗ-МОВЗ «Базальт» [27] на карте магнитного поля (а) и сейсмический разрез в показателях «рефлективности» по данному фрагменту профиля (б) [составлено авторами]
Fig. 3. Position of the fragment of the regional GSZ-MOVZ "Basalt" profile [27] on the magnetic field map (a) and the seismic section in the "reflexivity" indices for this profile fragment (b) [compiled by the authors]

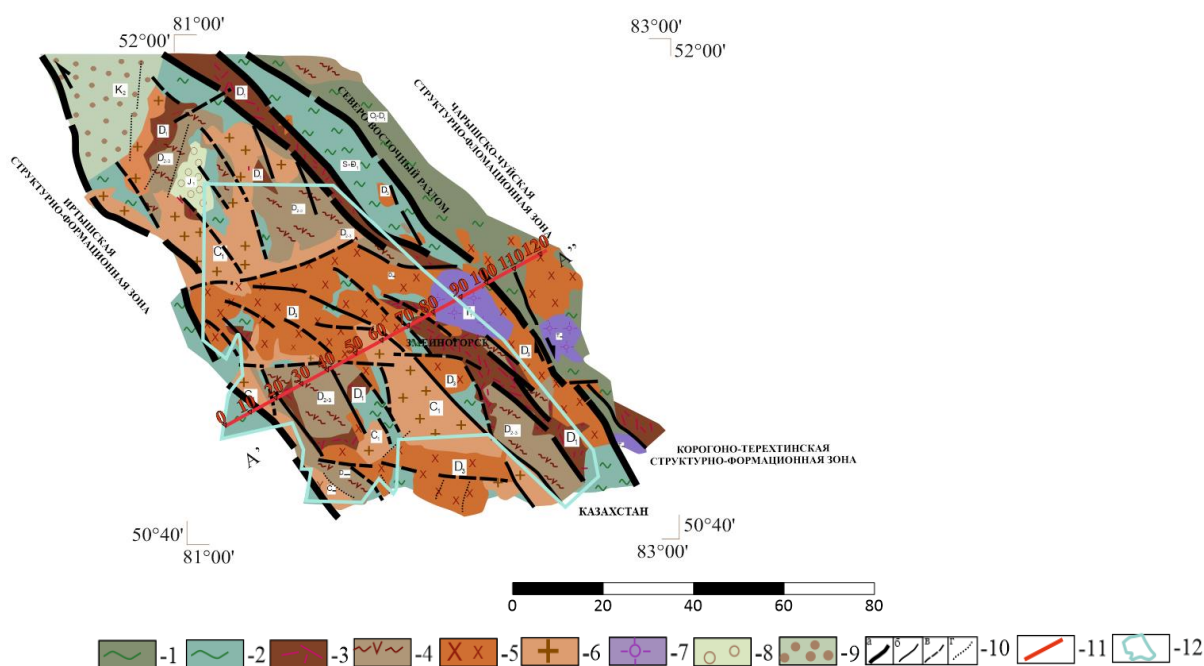


Рис. 4. Тектоническая схема Змеиногорского рудного района [составлено авторами]. Условные обозначения: 1–9 – структурно-вещественные подразделения (формации): 1, 2 – флишеидная (1 – терригенно-карбонатные осадки (O_1-D_1), 2 – флиш ($S-D_{1-2}$)); 3 – бимодальная базальт-дацит-риолитовая (D_1), габбро-плагиогранитовая; 4 – базальт-дацит-риолитовая (D_{2-3}); 5 – габбро-гранодиорит-гранитовая (D_3); 6 – габбро-гранодиорит-гранитовая (C_1); 7 – плюмазит-гранитовая (T_1); 8 – моласса (J_1); 9 – образования платформенного чехла (K_2); 10 – разрывные нарушения: а – главные (внешние тектонические границы), б – второстепенные, выделяемые менее уверенно, в – второстепенные, выделяемые менее уверенно, г – прочие дислокации; 11 – интерпретационный профиль; 12 – контур Змеиногорского рудного района
Fig. 4. Tectonic scheme of the Zmeinogorsk ore district [compiled by the authors]. Legend: 1–9 – structural and material subdivisions (formations): 1, 2 – flyschoid (1 – terrigenous-carbonate sediments (O_1-D_1), 2 – flysch ($S-D_{1-2}$)); 3 – bimodal basalt-dacite-rhyolite (D_1), gabbro-plagiogranite; 4 – basalt-dacite-rhyolite (D_{2-3}); 5 – gabbro-granodiorite-granite (D_3); 6 – gabbro-granodiorite-granite (C_1); 7 – plumbazite-granite (T_1); 8 – molasse (J_1); 9 – formations of the platform cover (K_2); 10 – discontinuities: а – main (external tectonic boundaries), б – secondary, allocated confidently, в – secondary, allocated less confidently, г – other dislocations; 11 – interpretation profile; 12 – outline of the Zmeinogorsk ore district

На схеме показано, что контуры исследуемого рудного района располагаются в пределах Змеиногорско-Быструшинского прогиба. Согласно результатам качественной интерпретации потенциальных полей и их трансформант и с учетом данных геологического картирования в пределах рассматриваемой площади выделяются рифтогенные дислокации, предположительно, раннедевонского заложения и более поздние надвиговые деформации (D_3 – C_1), искажающие структурный план этого рифтогенного грабена.

Рифтогенные структуры имеют линейную морфологию и ориентированы в северо-западном направлении; надвиговые деформации имеют криволинейную морфологию и сходную ориентацию в геологическом пространстве.

Сложный характер наложения этих главных типов деформаций определяет зональный характер строения прогиба. На геотектонической схеме нами выделяются три основные структурные зоны, различающиеся уровнем денудации и мощностью вулканогенно-осадочных толщ.

Западный и центральный фланги этой структуры (I и II зоны) характеризуются интенсивным проявлением дугообразных разломов общего северо-западного простирания, предположительно, надвиговой кинематики и секущих линейных дислокаций субширотного-северо-восточного простирания (предположительно, сдвиговой природы). При этом в пределах западного фланга (I) на дневной поверхности картируются девонские (D_{1-2}) рифтогенные комплексы, что указывает на относительно умеренный уровень денудации осадочно-вулканогенных образований этой зоны. В центральной (II) зоне на дневную поверхность выведены наиболее древние шельфовые осадки прогиба (S – D_{1-2}), указывающие на значительное воздымание и высокий уровень денудации девонских рифтогенных толщ, вмещающих оруденение. Во-

сточный фланг (III зона) практически не деформирован герцинскими складчато-надвиговыми дислокациями, вследствие чего здесь можно ожидать высокую сохранность рифтогенных толщ.

Обобщенный глубинный геолого-геофизический разрез прогиба построен по фрагменту профиля ГСЗ-МОВЗ «Базальт» на основе интерпретации комплекса геологических и геофизических данных, включая результаты инверсии гравитационного, магнитного полей. В соответствии с этими материалами на разрезе представлены границы радиальной расслоенности кристаллической коры и отдельные границы в разрезе вулканогенно-осадочных образований, а также разрывные нарушения [2].

Следует отметить высокую информативность результатов решения обратных задач вдоль регионального профиля (рис. 5), полученных с использованием методики И.Б. Мовчана [20, 21]. Этот псевдоплотностной разрез показывает воздымание более плотных образований фундамента в центральной части прогиба (зона II) при увеличении мощности вулканогенно-осадочных толщ относительно пониженной плотности на его флангах (зоны I и III).

Дополнительно выполнен расчет особых точек аналитической функции, аппроксимирующей элементы гравитационного поля методом деконволюции Эйлера с использованием алгоритмов М.Б. Штокаленко [28–30]. По характеру пространственного положения особых точек нами выполнено трассирование границ распространения вулканогенно-осадочных формаций Змеиногорско-Быструшинского прогиба на фоне кристаллического фундамента.

С использованием алгоритма М.Б. Штокаленко [29] вдоль представительного сечения построены псевдоплотностной разрез (рис. 6, а) и разрез эффективной намагниченности (рис. 6, б).

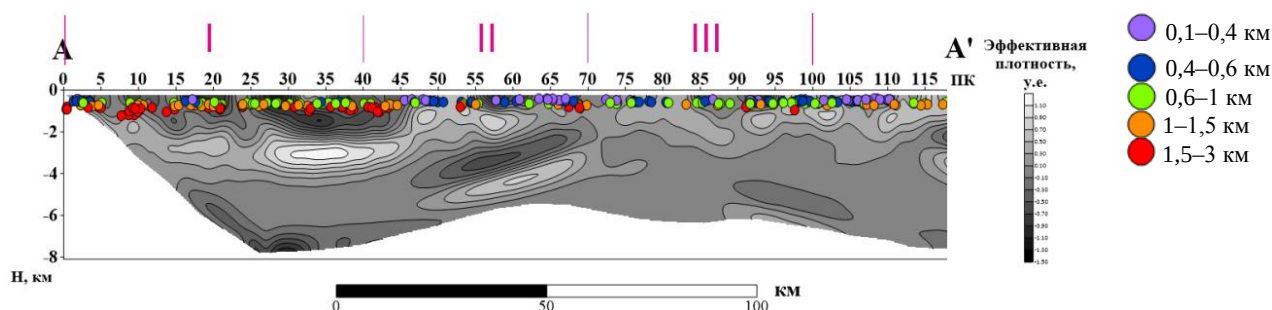
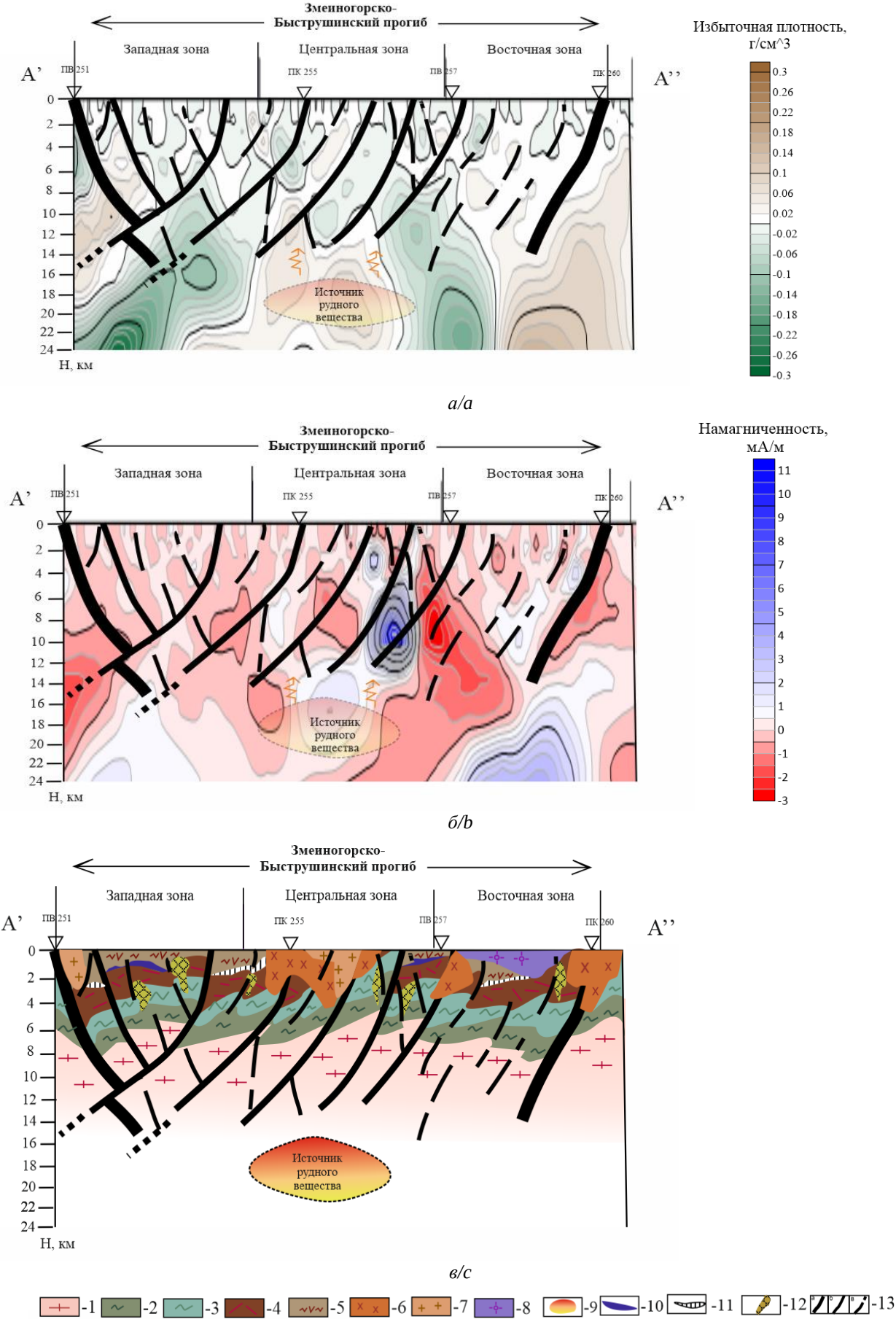


Рис. 5. Псевдоплотностной разрез по фрагменту регионального профиля ГСЗ-МОВЗ «Базальт» [20, 21] с наложением результатов расчета особых точек (деконволюция Эйлера) [составлено авторами]

Fig. 5. Pseudo-density section on a fragment of the regional profile of the GSZ-MOVZ "Basalt" [20, 21] with the superimposition of the results of the calculation of singular points (Euler deconvolution) [compiled by the authors]



Эти разрезы использованы в качестве основы для построения геолого-геофизического разреза Змеиногорско-Быструшинского прогиба с моделированием рифтогенных и надвиговых дислокаций, определяющих особенности строения прогиба (рис. 6, в). На разрезе нашли отображение особенности строения основных вулканогенных, осадочных и кристаллических образований, обусловленные последовательным проявлением рифтогенных и надвиговых дислокаций. На эту геолого-структурную основу нами вынесено предполагаемое расположение ареалов развития рудных формаций скрытого складчато-полиметаллического оруденения.

На псевдоплотностном разрезе (рис. 6, а) Змеиногорско-Быструшинский прогиб проявляется как область знакопеременных эффективных плотностей, которая ограничивается с флангов ареалами повышенной плотности. В центральной части разреза на глубине 15–20 км выделяется контрастная зона разуплотнения, которая интерпретируется нами как ареал древнего магматического очага. С последним могут быть связаны инъекции мантийного вещества и формирование девонских вулканогенно-осадочных формаций.

Анализ разреза эффективной намагниченности (рис. 6, б) также позволяет наметить положение аномального контура на глубинных уровнях центральной зоны, который совпадает с «источником магматического вещества», выделенным нами на псевдоплотностном разрезе. Рифтогенные тектонические деформации растяжения проявляются как

границы субвертикальных градиентных зон. Надвиговые деформации восточной вергентности на псевдоплотностном и псевдомагнитном разрезах картируются по локальным градиентным зонам, а также по смене инфраструктуры поля.

Согласно выполненным построениям, надвиговые деформации в пределах Змеиногорско-Быструшинского прогиба имеют строгую продольную зональность. При этом западный фланг прогиба относительно слабо затронут надвиговыми деформациями; в центральной зоне герцинские надвиговые деформации имеют наиболее высокие амплитуды перемещений, и здесь отмечается значительное вздымание образований кристаллического фундамента и шельфовых осадков дорифтогенной стадии развития (О-S) с их экспонированием на дневной поверхности; восточный фланг относительно слабо затронут надвиговыми деформациями, из-за чего здесь можно ожидать максимальную сохранность рифтогенных комплексов.

Эта картина находит объяснение в последовательном проявлении позднекаледонских процессов активной континентальной окраины, которые привели к заложению Змеиногорско-Быструшинского рифтогенного прогиба. В ходе герцинской эпохи тектоногенеза коллизионный орогенез проявился здесь в форме складчато-надвиговых деформаций [2]. С рифтогенной стадией мы связываем миграцию рудных растворов вдоль глубинных швов исследуемого грабена; коллизионный орогенез оказал влияние на локализацию рудовмещающих толщ.

Рис. 6. Проявление разрывных нарушений а) на псевдоплотностном разрезе, построенном по методу М.Б. Штокаленко [29]; б) на разрезе эффективной намагниченности, построенной тем же методом; в) интерпретационный геолого-геофизический разрез верхней коры [составлено авторами]. Условные обозначения: 1–8 – структурно-вещественные подразделения: 1 – гранито-гнейсовый слой верхней коры; 2, 3 – осадочные формации древнего шельфа (2 – терригенно-карбонатная (О-S), 3 – флишодная (S-D₁₋₂); 4 – бимодальная базальт-риолитовая, риолит-риодацитовая и габбро-плагиогранитовая серия (D₁₋₂); 5 – вулканогенно-осадочные отложения базальт-дацит-риолитовой серии (D₂₋₃); 6 – габбро-гранодиоритовая формация (D₃); 7 – габбро-гранодиорит-гранитовая формация (C₁); 8 – плюмазитгранитовая формация (T₁); 9 – предполагаемый источник рудного вещества; 10–12 – рудные формации (10 – сплошные колчеданно-полиметаллические руды, 11 – прожилково-вкрапленные, 12 – субвулканические порфировые тела с гнездово-вкрапленным оруденением); 13 – разрывные нарушения (а, б – рифтогенные (а – главные, б – второстепенные), в – надвиговые, обусловленные, предположительно, герцинскими орогенезом)

Fig. 6. Manifestation of discontinuities a) on the pseudodensity section constructed by the method of M.B. Shtokalenko [29]; b) on the section of effective magnetization constructed by the same method; c) interpretive geological and geophysical section of the upper crust [compiled by the authors]. Legend: 1–8 – structural and material subdivisions: 1 – granite-gneiss layer of the upper crust; 2–3 – sedimentary formations of the ancient shelf (2 – terrigenous-carbonate (O-S), 3 – flyschoid (S-D₁₋₂); 4 – bimodal basalt-rhyolite, rhyolite-rhyodacite and gabbro-plagiogranite series (D₁₋₂); 5 – volcanogenic-sedimentary deposits of basalt-dacite-rhyolite series (D₂₋₃); 6 – gabbro-granodiorite formation (D₃); 7 – gabbro-granodiorite-granite formation (C₁); 8 – plumbite-granite formation (T₁); 9 – supposed source of ore substance; 10–12 – ore formations (10 – solid cupreous-polymetallic ores, 11 – vein-embedded, 12 – subvolcanic porphyry bodies with nested-embedded mineralization); 13 – discontinuities (a, б – riftogenic (a – main, б – secondary), в – thrust faults, presumably caused by the Hercynian orogeny)

В пределах рудного района выделяется несколько типов оруденения:

- *сплошные колчеданно-полиметаллические руды*, которым характерны куполообразные формы, локализующиеся над выходами газогидротермальных растворов;
- *прожилково-вкрапленные руды*, указывающие на гидротермально-метасоматические механизмы образования;
- *субвулканические порфировые тела с гнездово-вкрапленным оруденением*, характеризующие наличие ингредиентов глубинного очага в процессе формирования рудных тел.

Однако при изучении закономерностей локализации рудных объектов должен учитываться и более поздний герцинский орогенез, обусловленный сближением и столкновением Сибирского и Казахстанского палеоконтинентов (D_3-C_1). По результатам качественной интерпретации гравитационного и магнитного полей на площади исследований мы моделируем серию надвиговых деформаций, которые искажают структуры Змеиногорско-Быструшинского прогиба. При этом характер складчато-надвиговых деформаций существенно различается на западном, центральном и восточном флангах [30, 31].

Западная часть относительно слабо затронута надвиговыми деформациями, вследствие чего наблюдается высокая мощность вулканогенно-осадочной толщи, включающей древние шельфовые осадки и более молодые девонские вулканические формации [32]. По результатам расчетов методом особых точек оценочная мощность упомянутого слоя составляет 2–3 км.

Центральная часть наиболее интенсивно деформирована надвигами, которые выводят на дневную поверхность раннекаледонские шельфовые осадки. Мощность вулканической толщи здесь минимальна, следовательно, здесь можно ожидать проявления рудных объектов только приконтактового типа.

Восточная часть слабо затронута надвиговыми дислокациями, что позволяет сохранить в исходной форме образования активной континентальной окраины. В вертикальном сечении здесь выделяются вулканогенно-осадочные толщи базальт-дацит-риолитовой формации (D_{1-2} и D_{2-3}).

Вдоль всего профиля картируются ареалы развития гранитоидов (D_3-C_1).

На основе комплексного анализа выполненных построений, с учетом опыта геохимических и минерагенических исследований Рудного Алтая, можно сделать вывод о том, что наибольший интерес при поисках скрытого колчеданно-полиметаллического оруденения в пределах Змеиногорского рудного района представляет его восточный фланг – Змеиногорско-Быструшинский

прогиб. В данной относительно слабо денудированной зоне предполагается развитие всех трех типов оруденения. Доминирующую роль в их составе играют субвулканические порфировые тела с гнездово-вкрапленным оруденением. Согласно опыту ранее проведенных исследований, рудоформирующие ареалы тяготеют к глубинным разрывным нарушениям [33, 34]. В ходе прогнозных построений в качестве признаков были задействованы параметры гравитационного и магнитного полей, наиболее проявленные на трансформациях горизонтального градиента и локальной составляющей, полученной при разложении полей [35, 36].

Разработанная тектоническая схема и глубинный (тектонический) разрез позволяют выявить ряд геолого-структурных критериев, которые могут использоваться на стадии прогнозноминерагенических построений [37, 38]. К таким критериям относятся:

- развитие трех структурных зон с разным уровнем воздымания и денудации;
- доминирующие разрывные нарушения двух рангов (а – более древние, линейные дислокации (сбросы) относящиеся к рифтогенным событиям; б – более молодые разломы дугообразной морфологии, заложение которых обусловлено влиянием коллизионных процессов, проявившихся в ходе аккреции Сибирского и Казахстанского палеоконтинентов);
- ареалы проявления рудоносных формаций средне-позднедевонского периода и перекрывающих их позднедевонских гранитных комплексов.

Кроме того, следует учитывать проявление более молодых гранитных интрузий (C_1 , T_1) [39], которые могут рассматриваться в качестве одного из факторов, осложняющих поиск скрытого колчеданно-полиметаллического оруденения [40] в пределах Змеиногорского рудного района, локализованного в зоне рифтогенного Змеиногорско-Быструшинского прогиба.

На основе этих геолого-структурных критериев в дальнейшем планируется выполнение прогнозноминерагенических оценок методом вероятностного распознавания образов с обучением на геологически обоснованных эталонах колчеданно-полиметаллического оруденений.

Заключение

Предложенная технология обработки и интерпретации разнотипной геолого-геофизической информации позволяет выполнить геотектоническое районирование структур, характеризующих геодинамические обстановки, оказавшие особое влияние на закономерности локализации колчеданно-полиметаллического оруденения в пределах Змеи-

ногорского рудного района: тыловодужный рифто-генез позднекаледонской активной континентальной окраины и герцинский коллизионный орогенез, обусловленный коллизионным столкновением Сибирского и Казахстанского палеоконтинентов.

В результате комплексных преобразований нами сделан вывод о необходимости применения

многофакторного анализа для выявления наиболее достоверных геолого-структурных прогнозных критериев локализации скрытого колчеданно-полиметаллического оруденения с целью последующего решения прогнозных задач вероятностного распознавания образов, связываемых с рассмотренными предпосылками рудоформирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Оценка роли государства в управлении минеральными ресурсами / В.С. Литвиненко, Е.И. Петров, Д.В. Василевская, А.В. Яковенко, И.А. Наумов, М.А. Ратников // Записки Горного института. – 2023. – Т. 259. – С. 95–111.
2. Секерина Д.Д., Дергилева Е.А., Егоров А.С. Закономерности локализации структур каледонского и герцинского орогенеза Рудного Алтая // Региональная геология и металлогения. – 2023. – № 93. – С. 52–62.
3. К проблеме формирования колчеданно-полиметаллических месторождений / Б.А. Дьячков, М.А. Мизерная, А.П. Пяткова, А.Е. Бисатова, А.П. Мирошникова, О.Н. Кузьмина, Н.А. Зимановская, Т.А. Ойцева, З.И. Черненко // Отечественная геология. – 2021. – № 5. – С. 3–16.
4. Moye R.J., Reid J.C., Lee D.F. Volcanogenic polymetallic massive sulfide deposits (VMS) of the Carolina Terrane in central North Carolina: new perspectives and historical reports and data from the files of Phelps Dodge Exploration East (1975–1982) // North Carolina Geological Survey, Special Publication. – 2017. – Vol. 11. – P. 456–467.
5. Peter J.M., Kidder J.A. et al. Stable and radiogenic isotopes in the exploration for volcanogenic massive sulfide deposits // The Canadian Mineralogist. – 2022. – Vol. 60. – P. 433–468.
6. Дистанционные методы исследования в изучении структурно-геологических особенностей строения о. Итуруп (Курильские острова) / И.В. Таловина, Н.С. Крикун, Ю.Ю. Юрченко, А.С. Агеев // Записки Горного института. – 2022. – Т. 254. – С. 158–172.
7. Морфометрические параметры сульфидных руд как основа селективной рудоподготовки сырья / А.М. Дурягина, И.В. Таловина, Х. Либервирт, Р.К. Илалова // Записки Горного института. – 2022. – Т. 256. – С. 527–538.
8. Copper and zinc isotope variation of the VMS mineralization in the Kalatag district, eastern Tianshan, NW China / X.-H. Deng, R. Mathur, Y. Li, Q.-G. Mao, Y.-S. Wu, L.-Y. Yang, X. Chen, J. Xu // Journal of Geochemical Exploration. – 2019. – № 196. – P. 8–19.
9. Pilote J.-L., Piercey S.J., Mercier-Langevin P. Evolution of the subseafloor hydrothermal system associated with the Ming VMS deposit, Newfoundland Appalachians, and its controls on base and precious metal distribution // Mineralium Deposita. – 2020. – Vol. 55. – P. 913–936.
10. Серавина Т.В., Кузнецов В.В. Опыт и результаты прогноза и поисков колчеданно-полиметаллических месторождений 2009–2017 гг. // Руды и металлы. – 2018. – № 3. – С. 16–24.
11. Кашин С.В., Молчанов А.В., Шатов В.В. Гидротермально-метасоматические формации регионального распространения и их использование для прогнозирования скрытого колчеданно-полиметаллического оруденения (на примере Змеиногорского рудного района, Рудный Алтай) // Региональная геология и металлогения. – 2013. – № 56. – С. 65–77.
12. Серавина Т.В., Кузнецова С.В., Филатова Л.К. Особенности вещественного состава вмещающих пород и руд Лазурского рудного поля (Змеиногорский рудный район, Рудноалтайская минерагеническая зона) // Отечественная геология. – 2021. – № 3–4. – С. 36–47.
13. Кузнецова С.В. Некоторые вопросы генезиса и минералогические особенности стратиформных руд колчеданно-полиметаллических месторождений Рудного Алтая, Алтайский край // Руды и металлы. – М.: ЦНИГРИ, 2017. – С. 40–50.
14. Космоструктурная модель Зырянского рудного района (Рудный Алтай) / Ю.С. Ананьев, А.А. Поцелуев, В.Г. Житков, В.Н. Назаров, А.С. Кузнецов // Известия Томского политехнического университета. – 2010. – Т. 316. – № 1: Науки о Земле. – С. 24–31.
15. Age and chemostratigraphy of the Finlayson Lake District, Yukon: implications for Volcanogenic Massive Sulfide (VMS) / M.J. Manor, S.J. Piercey, D.C. Murphy, C.J. Wall // Mineralization and Tectonics along the Western Laurentian Continental Margin: Lithosphere. – 2022. – Vol. 2022. – P. 1–45.
16. Гаськов И.В. Особенности эндогенной металлогении Горного и Рудного Алтая (Россия) // Геология и геофизика. – 2018. – Т. 59. – № 8. – С. 1254–1270.
17. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1000000 (третье поколение). Серия Алтае-Саянская. Лист М-44 – Рубцовск. Объяснительная записка / Н.И. Гусев, Ю.Е. Вовшин, А.А. Круглова, М.Г. Пушкин и др. – СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2015. – 415 с.
18. Zhiyuan Sun, Xiaohua Deng, Franco Pirajno. Textures, trace element compositions, and sulfur isotopes of pyrite from the Honghai volcanogenic massive sulfide deposit: Implications for ore genesis and mineral exploration // Science China Earth Sciences. – 2023. – Vol. 66. – P. 738–764.
19. Закономерности проявления рудных систем в потенциальных полях / С.Г. Алексеев, А.С. Духанин, Н.П. Сенчина, М.Б. Штокаленко // Материалы 46 сессии Межднар. науч. семинара им. Успенского. – Пермь: ГИ УрО РАН, 2019. – С. 26–32.
20. Movchan I.B., Yakovleva A.A. Approach to automation of field diagnosis data interpretation for localization of pitting in the pipeline wall // International Journal of Civil Engineering. – 2019. – Vol. 10. – P. 1571–1581.
21. Информационно-статистический прогноз нефтегазоносности в краевой части Корякско-Камчатской складчатой области / Д.Ф. Калинин, А.С. Егоров, Н.В. Большакова, Д.Д. Секерина // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. – 2023. – № 1. Выпуск 57. – С. 63–88.

22. Мовчан И.Б., Шайгаллямова З.И., Яковлева А.А. Выявление факторов структурного контроля коренных золоторудных проявлений методом беспилотной аэромагниторазведки на примере Нерюнгринского района Якутии // Записки Горного института. – 2022. – Т. 254. – С. 217–233.
23. Мовчан И.Б., Яковлева А.А. Уточнение оценок сейсмического микрорайонирования с оптимизацией априорных данных // Записки Горного института. – 2019. – Т. 236. – С. 133–141.
24. Духанин А.С., Алексеев С.Г., Сенчина Н.П. Структура струйных ореолов рассеяния глубокозалегающих месторождений Рудного Алтая // Региональная геология и металлогения. – 2019. – № 80. – С. 75–94.
25. Гусев А.И., Гусев Н.И. Геодинамика и металлогения мезозой-кайнозойского этапа Горного Алтая // Современные наукоемкие технологии. – 2014. – № 8. – С. 60–65.
26. Denisov N., Piercey S.J. Evolution of the hydrothermal system associated with the ABM replacement-style volcanogenic massive sulfide deposit, Finlayson Lake District, Yukon, Canada // Economic Geology. – 2023. – Vol. 118 (5). – P. 1055–1083.
27. Гусев А.И. Мантийно-коровое взаимодействие в генерации различных типов оруденения: геофизический и петрологический аспекты // Известия Томского политехнического университета. – 2009. – Т. 315. – № 1. – С. 18–25.
28. Визуализация в потенциальных полях мантийно-коровых структур, контролирующих кимберлитовый и лампроитовый магматизм / С.Г. Алексеев, П.А. Бочков, Н.П. Сенчина и др. // Смирновский сборник. – М.: Макс ПРЕСС, 2018. – С. 292–307.
29. Areas of negative excess density of the Earth's crust as sources of energy for ore formation / M.B. Shtokalenko, S.G. Alekseev, N.P. Senchina, S.Y. Shatkevich. – Kazan: Kazan Federal University, 2019. – Vol. 1. – P. 279–284.
30. Блинов П.А., Садыков М.И. Оценка упруго-прочностных свойств цементно-эпоксидных систем // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2023. – Т. 334. – № 1. – С. 97–105.
31. Subseafloor sulphide deposit formed by pumice replacement mineralization / T. Nozaki, T. Nagase, Y. Takaya, T. Yamasaki, T. Otake // Scientific Reports. – 2021. – Vol. 11. – P. 1–11.
32. Lafrance B., Gibson H.L., Stewart M.S. Internal and external deformation and modification of volcanogenic massive sulfide deposits // Reviews in Economic Geology. – 2020. – Vol. 21. – P. 147–171.
33. Prischepa O.M. et al. Theoretical and methodological approaches to identifying deep accumulations of oil and gas in oil and gas basins of the Russian Federation // Frontiers in Earth Science. – 2023. – Vol. 11. – P. 1–22.
34. Volcanology, geochemistry and geodynamic setting of Neoproterozoic Sunrise volcanogenic massive sulfide deposit, Beaulieu River volcanic belt, Slave craton, Northwest Territories, Canada / Y.M. de Wolfe, B. Knox, S. Lilley, E.J. MacMillan, C.A. Partin // Precambrian Research. – 2022. – Vol. 372. – P. 106608.
35. Ганженко Г.Д., Юдовская М.А., Викентьев И.В. Золото-полиметаллическая минерализация Риддер-Сокольного месторождения на Рудном Алтае (Восточный Казахстан) // Минералогия. – 2018. – № 4 (1). – С. 8–34.
36. Tracing the source of hydrothermal fluid in ophiolite related volcanogenic massive sulfide deposits: a case study from the Italian Northern Apennines / G.B. Kiss, K. Molnár, Z. Benkó, P. Skoda, Z. Kapui, G. Garuti, F. Zaccarini, L. Palcsu, G. Czuppon // Minerals. – 2023. – № 13 (8). – P. 2–19.
37. Reconstruction of hydrothermal processes in the Cyprus type Fe-Cu-Zn deposits of the Italian Northern Apennines: results of combined fluid inclusion microthermometry, SEM-CL imaging and trace element analyses by LA-ICP-MS / G.B. Kiss, Z. Bendő, G. Garuti, F. Zaccarini, E. Király, F. Molnár // Minerals. – 2021. – № 11 (2). – P. 1–21.
38. Integration of seismic refraction and fracture-induced electromagnetic radiation methods to assess the stability of the roof in mine-workings / S. Daniliev, N. Danilieva, S. Mulev, V. Frid // Minerals. – 2022. – № 12 (5). – P. 1–11.
39. Коррекция глубинно-скоростных моделей методом гравиметрической разведки для труднодоступных участков шельфовой зоны / Т. Мингалева, Г. Горелик, А. Егоров, В. Гулин // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 10-1. – С. 77–86.
40. Geochemical evidence for a magmatic contribution to the metal budget of the Windy Craggy Cu-Co(±Zn) volcanogenic massive-sulfide deposit, northwestern British Columbia / M.I. Leybourne, J.M. Peter, M.A. Schmidt, D. Layton-Matthews, A. Voinot, L. Mathieu // Geological Survey of Canada. – 2022. – № 617. – P. 287–312.

Информация об авторах

Алексей Сергеевич Егоров, доктор геолого-минералогических наук, заведующий кафедрой геофизики Санкт-Петербургского горного университета, Россия, 199106, г. Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия, 2. egorov_as@pers.spmi.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3501-9145>

Дмитрий Федорович Калинин, доктор технических наук, профессор кафедры геофизики Санкт-Петербургского горного университета, Россия, 199106, г. Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия, 2. kalinin_df@pers.spmi.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0597-263X>

Дарья Денисовна Секерина, аспирант кафедры геофизики Санкт-Петербургского горного университета, Россия, 199106, г. Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия, 2. sekerinadar@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3892-7947>

Поступила в редакцию: 17.10.2023

Поступила после рецензирования: 31.10.2023

Принята к публикации: 19.06.2024

REFERENCES

1. Litvinenko V.S., Petrov E.I., Vasilevskaya D.V., Yakovenko A.V., Naumov I.A., Ratnikov M.A. Assessment of the role of the state in the management of mineral resources. *Notes of the Mining Institute*, 2023, no. 259, pp. 95–111. (In Russ.)
2. Sekerina D.D., Dergileva E.A., Egorov A.S. Regularities of localization of structures of the Caledonian and Hercynian orogeny of the Ore Altai. *Regional geology and metallogeny*, 2023, no. 93, pp. 52–62. (In Russ.)
3. Dyachkov B.A., Misernaya M.A., Pyatkova A.P., Bisatova A.E., Miroshnikova A.P., Kuzmina O.N., Zimanovskaya N.A., Oitseva T.A., Chernenko Z.I. On the problem of formation of pyrite-polymetallic deposits. *Russian Geology*, 2021, no. 5, pp. 3–16. (In Russ.)
4. Moya R.J., Reid J.C., Lee D.F. Volcanogenic polymetallic massive sulfide deposits (VMS) of the Carolina Terrane in central North Carolina: new perspectives and historical reports and data from the files of Phelps Dodge Exploration East (1975–1982). *North Carolina Geological Survey, Special Publication*, 2017, no. 11, pp. 456–467.
5. Peter J.M., Kidder J.A. Stable and radiogenic isotopes in the exploration for volcanogenic massive sulfide deposits. *The Canadian Mineralogist*, 2022, vol. 60, pp. 433–468.
6. Talovina I.V., Krikun N.S., Yurchenko Yu.Yu., Ageev A.S. Remote research methods in the study of structural and geological features of the structure of O. Iturup (Kuril Islands). *Notes of the Mining Institute*, 2022, no. 254, pp. 158–172. (In Russ.)
7. Duryagina A.M., Talovina I.V., Liebert H., Ilalova R.K. Morphometric parameters of sulfide ores as a basis for selective ore preparation of raw materials. *Notes of the Mining Institute*, 2022, no. 256, pp. 527–538. (In Russ.)
8. Deng X.-H., Mathur R., Li Y., Mao Q.-G., Wu Y.-S., Yang L.-Y., Chen X., Xu J. Copper and zinc isotope variation of the VMS mineralization in the Kalatag district, eastern Tianshan, NW China. *Journal of Geochemical Exploration*, 2019, no. 196, pp. 8–19.
9. Pilote J.-L., Piercey S.J., Mercier-Langevin P. Evolution of the subseafloor hydrothermal system associated with the Ming VMS deposit, Newfoundland Appalachians, and its controls on base and precious metal distribution. *Mineralium Deposita*, 2020, no. 55, pp. 913–936.
10. Seravina T.V., Kuznetsov V.V. Experience and results of forecasting and prospecting of pyrite-polymetallic deposits 2009–2017. *Ores and metals*, 2018, no. 3, pp. 16–24. (In Russ.)
11. Kashin S.V., Molchanov A.V., Shatov V.V. Hydrothermal-metasomatic formations of regional distribution and their use for forecasting hidden pyrite-Polymetallic mineralization (on the example of the Zmeinogorsky ore district, Rudny Altai). *Regional geology and metallogeny*, 2013, no. 56, pp. 65–77. (In Russ.)
12. Seravina T.V., Kuznetsova S.V., Filatova L.K. Features of the material composition of the host rocks and ores of the Lazursky ore field (Zmeinogorsky ore district, Rudnoaltay minerogenic zone). *Russian Geology*, 2021, no. 3–4, pp. 36–47. (In Russ.)
13. Kuznetsova S.V. Some questions of genesis and mineralogical features of stratiform ores of pyrite-polymetallic deposits of the Ore Altai, Altai Krai. *Ores and Metals*. Moscow, TsNIGRI, 2017. pp. 40–50. (In Russ.)
14. Ananyev Yu.S., Potseluyev A.A., Zhitkov V.G., Nazarov V.N., Kuznetsov A.S. Cosmostructural model of the Zyryanovsky ore district (Rudny Altai). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2010, vol. 316, no. 1, pp. 24–31. (In Russ.)
15. Manor M.J., Piercey S.J., Murphy D.C., Wall C.J. Age and chemostratigraphy of the Finlayson Lake District, Yukon: implications for Volcanogenic Massive Sulfide (VMS) Mineralization and Tectonics along the Western Laurentian Continental Margin: *Lithosphere*, 2022, vol. 2022, pp. 1–45.
16. Gaskov I.V. Features of endogenous metallogeny of the Mining and Ore Altai (Russia). *Geology and Geophysics*, 2018, vol. 59, no. 8, pp. 1254–1270.
17. Gusev N.I., Vovshin Yu.E., Kruglova A.A., Pushkin M.G. *State Geological Map of the Russian Federation. Scale 1:1000000 (third generation). Altai-Sayan series. Sheet M-44 – Rubtsovsk. Explanatory note*. St. Petersburg, VSEGEI Cartographic Factory Publ., 2015. 415 p. (In Russ.)
18. Zhiyuan Sun, Xiaohua Deng, Franco Pirajno. Textures, trace element compositions, and sulfur isotopes of pyrite from the Honghai volcanogenic massive sulfide deposit: Implications for ore genesis and mineral exploration. *Science China Earth Sciences*, 2023, vol. 66, pp. 738–764.
19. Alekseev S.G., Dukhanin A.S., Senchina N.P., Shtokalenko M.B. Patterns of manifestation ore systems in potential fields. *Proceedings of the 46th session of the International Scientific seminar named after Uspensky*. Perm, GI UrO RAS Publ., 2019. pp. 26–32. (In Russ.)
20. Movchan I.B., Yakovleva A.A. Approach to automation of field diagnosis data interpretation for localization of pitting in the pipeline wall. *International Journal of Civil Engineering*, 2019, vol. 10, pp. 1571–1581.
21. Kalinin D.F., Egorov A.S., Bolshakova N.V., Sekerina D.D. Information and statistical forecast of oil and gas potential in the marginal part of the Koryak-Kamchatka folded region. *Herald of KRAUNTS. Earth sciences*, 2023, no. 1, Iss. 57, pp. 63–88. (In Russ.)
22. Movchan I.B., Shaigallyamova Z.I., Yakovleva A.A. Identification of factors of structural control of indigenous gold ore manifestations by the method of unmanned aerial magnetic exploration on the example of the Neryungrinsky district of Yakutia. *Notes of the Mining Institute*, 2022, vol. 254, pp. 217–233.
23. Movchan I.B., Yakovleva A.A. Refinement of estimates of seismic microdistricting with optimization of a priori data. *Notes of the Mining Institute*, 2019, vol. 236, pp. 133–141.
24. Dukhanin A.S., Alekseev S.G., Senchina N.P. Structure of jet scattering halos of deep-lying deposits of the Ore Altai. *Regional geology and metallogeny*, 2019, no. 80, pp. 75–94. (In Russ.)
25. Gusev A.I., Gusev N.I. Geodynamics and metallogeny of the Mesozoic-Cenozoic stage of the Altai Mountains. *Modern High-tech Technologies*, 2014, no. 8, pp. 60–65. (In Russ.)
26. Denisová N., Piercey S.J. Evolution of the hydrothermal system associated with the ABM replacement-style volcanogenic massive sulfide deposit, Finlayson Lake District, Yukon, Canada. *Economic Geology*, 2023, vol. 118 (5), pp. 1055–1083.
27. Gusev A.I. Mantle-crustal interaction in the generation of various types of mineralization: geophysical and petrological aspects. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2009, vol. 315, no. 1, pp. 18–25. (In Russ.)

28. Alekseev S.G., Bochkov P.A., Senchina N.P. Visualization in potential fields of mantle-crustal structures controlling kimberlite and lamproite magmatism. *Smirnov Collection*. Moscow, Max PRESS, 2018. pp. 292–307. (In Russ.)
29. Shtokalenko M.B., Alekseev S.G., Senchina N.P., Shatkevich S.Y. Areas of negative excess density of the Earth's crust as sources of energy for ore formation. Ed. By D.K. Nurgaliev. Kazan, Kazan Federal University Publ., 2019. Vol. 1, pp. 279–284. (In Russ.)
30. Blinov P.A., Sadykov M.I. Assessment of elastic-strength properties of cement-epoxy systems. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2023, vol. 334, no. 1, pp. 97–105. (In Russ.)
31. Nozaki T., Nagase T., Takaya Y., Yamasaki T., Otake T. Subseafloor sulphide deposit formed by pumice replacement mineralization. *Scientific Reports*, 2021, vol. 11, pp. 1–11.
32. Lafrance B., Gibson H.L., Stewart M.S. Internal and external deformation and modification of volcanogenic massive sulfide deposits. *Reviews in Economic Geology*, 2020, vol. 21, pp. 147–171.
33. Prischepa O.M. Theoretical and methodological approaches to identifying deep accumulations of oil and gas in oil and gas basins of the Russian Federation. *Frontiers in Earth Science*, 2023, vol. 11, pp. 1–22.
34. De Wolfe Y.M., Knox B., Lilley S., MacMillan E.J., Partin C.A. Volcanology, geochemistry and geodynamic setting of Neoproterozoic Sunrise volcanogenic massive sulfide deposit, Beaulieu River volcanic belt, Slave craton, Northwest Territories, Canada. *Precambrian Research*, 2022, vol. 372, pp. 106608.
35. Ganzhenko G.D., Yudovskaya M.A., Vikentiev I.V. Gold-polymetallic mineralization of the Ridder-Sokolny deposit in the Ore Altai (East Kazakhstan). *Mineralogy*, 2018, no. 4 (1), pp. 8–34. (In Russ.)
36. Kiss G.B., Molnár K., Benkő Z., Skoda P., Kapui Z., Garuti G., Zaccarini F., Palcsu L., Czuppon G. Tracing the source of hydrothermal fluid in ophiolite related volcanogenic massive sulfide deposits: a case study from the Italian Northern Apennines. *Minerals*, 2023, no. 13 (8), pp. 2–19.
37. Kiss G.B., Bendő Z., Garuti G., Zaccarini F., Király E., Molnár F. Reconstruction of hydrothermal processes in the Cyprus type Fe-Cu-Zn deposits of the Italian Northern Apennines: results of combined fluid inclusion microthermometry, SEM-CL imaging and trace element analyses by LA-ICP-MS. *Minerals*, 2021, no. 11 (2), pp. 1–21.
38. Daniliev S., Danilieva N., Mulev S., Frid V. Integration of seismic refraction and fracture-induced electromagnetic radiation methods to assess the stability of the roof in mine-workings. *Minerals*, 2022, no. 12 (5), pp. 1–11.
39. Mingaleva T., Gorelik G., Egorov A., Gulin V. Correction of depth-velocity models by the method of gravimetric exploration for hard-to-reach areas of the shelf zone. *Mining information and analytical bulletin*, 2022, no. 10 (1), pp. 77–86. (In Russ.)
40. Leybourne M.I., Peter J.M., Schmidt M.A., Layton-Matthews D., Voinot A., Mathieu L. Geochemical evidence for a magmatic contribution to the metal budget of the Windy Craggy Cu-Co(±Zn) volcanogenic massive-sulfide deposit, northwestern British Columbia. *Geological Survey of Canada, Bulletin*, 2022, no. 617, pp. 287–312.

Information about the authors

Alexey S. Egorov, Dr. Sc., Head of the Geophysics Department, Saint Petersburg Mining University, 2, 21 line, Vasilievsky Island, St. Petersburg, 191106, Russian Federation. egorov_as@pers.spmi.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3501-9145>

Dmitry F. Kalinin, Dr. Sc., Professor, Saint Petersburg Mining University, 2, 21 line, Vasilievsky Island, St. Petersburg, 191106, Russian Federation. kalinin_df@pers.spmi.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0597-263X>

Darya D. Sekerina, Postgraduate Student, Saint Petersburg Mining University, 2, 21 line, Vasilievsky Island, St. Petersburg, 191106, Russian Federation. sekerinadar@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3892-7947>

Received: 17.10.2023

Revised: 31.10.2023

Accepted: 19.06.2024

УДК 552.328

DOI: 10.18799/24131830/2024/8/4432

Шифр специальности ВАК: 1.6.21

Наледи в бассейне р. Уды (Западное Забайкалье): особенности современного распространения и возможности использования

В.Н. Черных[✉], Б.З. Цыдыпов, Б.В. Содномов, А.А. Аюржанаев,
М.А. Жарникова, Б.О. Гуржапов, Е.Ж. Гармаев

Байкальский институт природопользования СО РАН, Россия, г. Улан-Удэ

[✉]geosibir@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность* исследования определяется увеличением интенсивности наледных процессов на территории Западного Забайкалья с 2019 г. по настоящее время в связи с наступлением многоводного климатического цикла. Объемы наледей ежегодно увеличиваются, наблюдаются случаи подтопления населенных пунктов и объектов инфраструктуры, что делает целесообразным современное детальное изучение наледей с применением новых технологий и подходов. В бассейне р. Уды, который выбран в качестве территории исследования, наледи изучены недостаточно полно, сведений о них в литературе мало. Вместе с тем они являются ценным ресурсом, поскольку в массивных ледяных полях аккумулируется значительная часть зимнего стока как поверхностных, так и подземных вод, поэтому наледи можно использовать в хозяйственных целях в качестве источника водоснабжения сельскохозяйственного производства при их таянии в теплое время года. *Целью* работы является оценка интенсивности проявления наледных процессов в пределах бассейна р. Уды с выявлением общих закономерностей современного распространения наледей, влияния различных факторов среды на их динамику, а также возможностей использования. *Объекты:* наледи, формирующиеся в холодный сезон года в бассейне р. Уды в условиях расчлененного среднегорного рельефа и широкого распространения многолетнемерзлых пород. *Методы:* дистанционные и полевые экспедиционные методы научного исследования. В качестве источника информации при дистанционном изучении применялись космические снимки Landsat-4-5, Landsat-8, Sentinel-2, а также данные Ресурс-П. Полевыми методами в процессе проведения наледнемерных съемок получены сведения о мощности наледей, с использованием БПЛА составлены локальные цифровые модели местности ключевых участков в районах развития наледей. Обработка данных производилась с использованием ГИС-методов. *Результаты.* Получены оперативные (текущая ситуация) и ретроспективные карты расположения наледей. На территории общей площадью около 35 тыс. км² в зимний период, в зависимости от природно-климатической обстановки, формируется до 3,2 тыс. наледей. В маловодные климатические циклы число наледей сокращается в 1,5 раза. Большое количество наледей при их сравнительно небольших размерах является следствием прерывистости криолитозоны в районе исследования. Преобладают наледи подземных вод, в ледяных полях которых в холодный период года заключается большая часть дебета их источников. Наледи бассейна р. Уды характеризуют запасы подземных вод территории, они могут быть использованы в качестве источников водоснабжения сельскохозяйственного производства в засушливый период с апреля по июнь, когда осадков практически не выпадает.

Ключевые слова: многолетнемерзлые породы, подземные воды, наледи, космические снимки, река Уда, Западное Забайкалье

Благодарности: Исследование выполнено в рамках проекта РНФ № 23-27-00402 «Наледи северной (российской) части бассейна р. Селенга».

Для цитирования: Наледи в бассейне р. Уды (Западное Забайкалье): особенности современного распространения и возможности использования / В.Н. Черных, Б.З. Цыдыпов, Б.В. Содномов, А.А. Аюржанаев, М.А. Жарникова, Б.О. Гуржапов, Е.Ж. Гармаев // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 8. – С. 161–173. DOI: 10.18799/24131830/2024/8/4432

UDC 552.328

DOI: 10.18799/24131830/2024/8/4432

Icings in the Uda river basin (Western Transbaikalia): peculiarities of modern distribution and possibilities of use

V.N. Chernykh[✉], B.Z. Tsydypov, B.V. Sodnomov, A.A. Ayurzhanayev,
M.A. Zharnikova, B.O. Gurzhapov, E.Z. Garmaev

Baikal Institute of Nature Management SB RAS, Ulan-Ude, Russian Federation

[✉]geosibir@yandex.ru

Abstract. Relevance. The increase in the intensity of icing formation in the territory of the Western Transbaikalia from 2019 to the present due to the beginning of the high-water climatic cycle. The volumes of icings increase annually, cases of flooding of settlements and infrastructure facilities are observed. This makes it advisable to conduct a modern detailed study of the icings using new technologies and approaches. In the Uda River basin, which was selected as the study area, icings have not been studied sufficiently, and there is little information about them in literature. At the same time, they are a valuable resource, since massive ice fields accumulate a significant part of the winter runoff of both surface and groundwater. Therefore, icings can be used for economic purposes as a source of water supply for agricultural production when they melt in the warm season. **Aim.** To assess the intensity of manifestation of icing formation within the Uda River basin with the identification of general patterns of modern distribution of the icings, the impact of various environmental factors on their dynamics, as well as the possibilities of their utilization. **Subjects.** Icings formed in the cold season in the Uda River basin in the conditions of dissected mid-mountainous relief and wide distribution of permafrost rocks (permafrost). **Methods.** Remote and field expeditionary methods of scientific research. Landsat-4-5, Landsat-8, Sentinel-2 space images and Resurs-P data were used as a source of information for remote sensing. Data on icings thickness were obtained using field methods in the course of icings surveys, and local digital terrain models of key sites in the areas of icings development were compiled using UAVs. Data processing was carried out using GIS methods. **Results.** Current and retrospective maps of icings location were obtained. On the territory with the total area of about 35 thousand km² up to 3.2 thousand icings are formed in winter depending on the natural and climatic conditions. During low-water climatic cycles, the number of icings decreases by 1.5 times. The large number of icings with their relatively small size is a consequence of the discontinuity of the cryolithozone in the study area. Groundwater icings prevail, where ice fields contain most of their runoff during the cold period of the year. The Uda River basin icings characterize the groundwater reserves of the territory and can be used as sources of water supply for agricultural production in the dry period from April to June, when there is practically no precipitation.

Keywords: permafrost, groundwater, icings, satellite images, Uda river, Western Transbaikalia

Acknowledgements: The research was carried out within the framework of the Russian Science Foundation project No. 23-27-00402 «Icings in the Northern (Russian) Part of the Selenga River Basin».

For citation: Chernykh V.N., Tsydypov B.Z., Sodnomov B.V., Ayurzhanayev A.A., Zharnikova M.A., Gurzhapov B.O., Garmaev E.Z. Icings in the Uda river basin (Western Transbaikalia): peculiarities of modern distribution and possibilities of use. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 8, pp. 161–173. DOI: 10.18799/24131830/2024/8/4432

Введение

Территория Западного Забайкалья отличается суровым резко континентальным климатом и широким распространением многолетнемерзлых пород (ММП), поэтому здесь активно проявляются криогенные процессы. Из всего их многообразия (морозобойное растрескивание, пучение и др.) по масштабам и частоте проявления выделяется наледеобразование. Наледи образуются в холодный сезон года в местах выхода на поверхность подземных вод в виде родников в руслах и долинах рек, вдоль ручьев, в узких распадках отрогов горных хребтов, у подножий их склонов. Несмотря на длительную историю исследования мерзлотных про-

цессов, специальных работ по наледям данной территории мало [1–3].

Наледи возникают тогда, когда скорость промерзания поверхностных водотоков и водовмещающих горизонтов горных пород превышает интенсивность сработки запасов воды, накопленных в предшествующий теплый период года [4]. Интенсивность наледеобразования зависит от множества условий, включая геологические, гидрогеологические и геоморфологические особенности территории, метеорологические факторы среды, в том числе сплошность и строение криолитозоны. Поэтому, изучение наледей, в т. ч. особенностей их распространения и пространственно-временной изменчивости, позволяет выяв-

лять закономерности динамики подземных вод и оценить состояние криолитозоны территории в условиях постоянно меняющегося климата.

Наледи являются потенциальным ресурсом для водоснабжения сельскохозяйственного производства, так как в холодный период года они аккумулируют значительные запасы подземных вод, которые в теплое время можно успешно использовать для орошения. Они активно использовались в хозяйстве как источник водоснабжения в прошлом [5], такая необходимость возникла и в настоящее время в связи с увеличением объемов производства в животноводстве и растениеводстве.

Объекты и методы исследования

Бассейн р. Уды (площадь 34,9 тыс. км²) расположен в центральной части Западного Забайкалья (рис. 1). Около 2/3 бассейна относится к Селенгинскому среднегорью. Районы верхнего течения рек Уды и Кудун, а также прилегающие к Еравнинским озерам, являются южной частью Витимского плоскогорья. На севере часть стока формируется в пределах горной системы Улан-Бургасы. Длина р. Уды

составляет 467 км, средний многолетний расход воды в 5 км от устья равен 69,8 м³/с.

В тектоническом отношении территория представляет собой систему складчатых структур, вытянутых в северо-восточном направлении. Горст-антиклинальные поднятия в рельефе выражены хребтами, грабен-синклинали – впадинами забайкальского типа [7]. Зоны разломов выражены по границам структур и в их пределах. Разломы разного ранга многочисленны [8].

Горные хребты территории (Цаган-Дабан, Улан-Бургасы, Курбинский, Худанский и др.) средневысотные (1500–1800 м), с плоскими вершинами и холмисто-увалистыми предгорьями, переходят в террасированные равнины впадин забайкальского типа. Складчатые структуры сложены в основном гранитоидами, в меньшей степени представлены метаморфические породы, впадины межгорных котловин выполнены юрско-меловыми и неоген-четвертичными отложениями разного генезиса [9]. Около 60 % территории занимают горные хребты, остальные 40 % – межгорные котловины, расчлененные русловой сетью рек и временных водотоков.

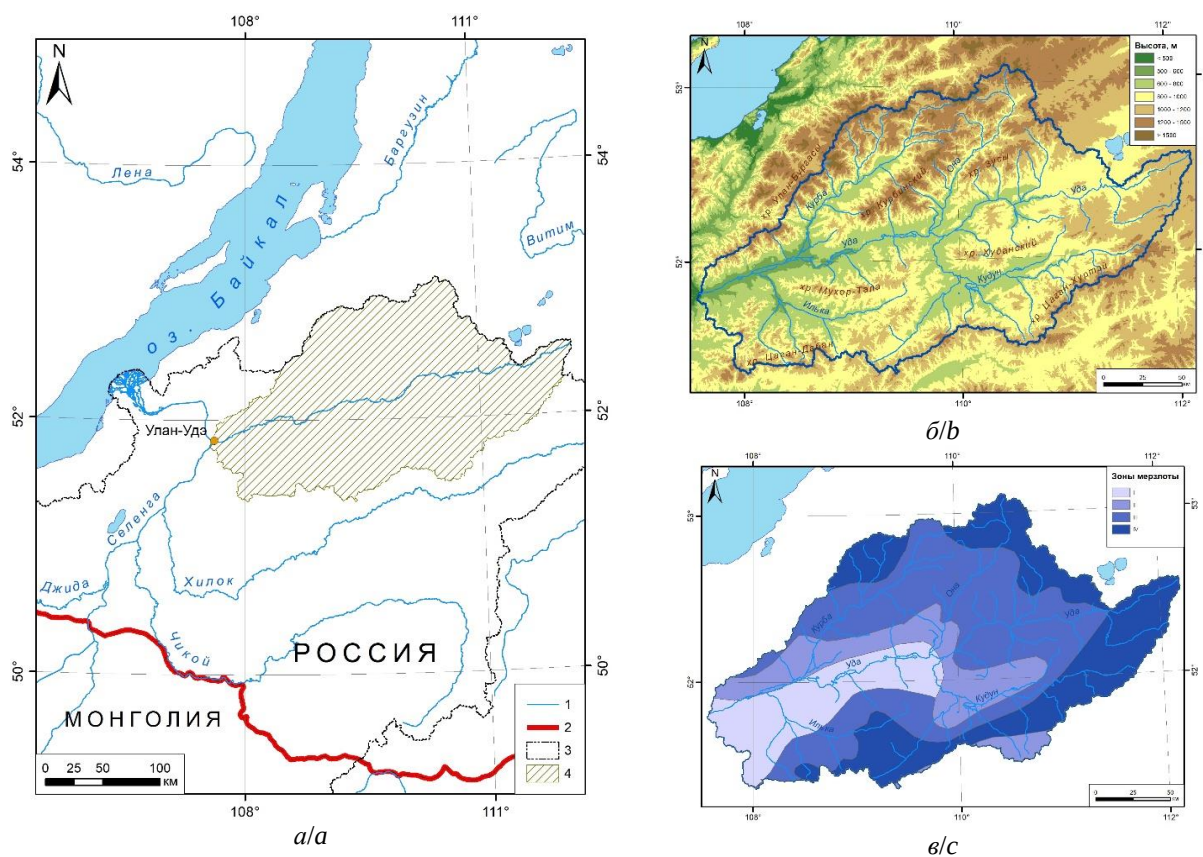


Рис. 1. Территория исследования: а) обзорная схема: 1 – речная сеть, 2 – государственная граница РФ, 3 – граница бассейна р. Селенги, 4 – бассейн р. Уды; б) орографическая схема; в) типы распространения ММП по [6]: I – талые породы, II – редко-островной, III – массивно-островной, IV – сплошной

Fig. 1. Study area: а) overview diagram: 1 – river network, 2 – state border of the Russian Federation, 3 – boundary of the Selenge River basin, 4 – Uda River basin; б) orographic scheme; в) types of permafrost distribution according to [6]: I – thawed rocks, II – sparsely insular, III – massively insular, IV – continuous

В гидрогеологическом отношении район исследования относится к западно-забайкальской гидрогеологической складчатой области с артезианскими бассейнами забайкальского типа и бассейнами трещинных вод [7]. Подземные воды артезианских бассейнов межгорных котловин, в зависимости от принадлежности к водоносному комплексу, залегают на глубинах от 0,5 до 150 м и более. Их питание происходит за счет инфильтрации с поверхности и притока с горных массивов по зонам трещиноватости, разгрузка происходит в руслах рек или через источники в зонах разломов. Значительную часть территории занимают бассейны трещинных вод, которые связаны с горными хребтами. Они отличаются разнообразием условий питания и разгрузки.

Расчлененный рельеф и суровый резко континентальный климат обуславливает широкое распространение в пределах бассейна р. Уды ММП. Геокриологические условия при этом достаточно разнообразны. В пределах Иволгино-Удинской впадины ММП имеют преимущественно редкоостровное распространение, массивно-островной тип распространения ММП характерен для южной и центральной частей территории, включая горные хребты Цаган-Дабан, Худанский и др., а также расположенные между ними межгорные котловины с долинами рек Куйтунка, Брянка, Илька, Кижинга и др. (рис. 1, в). На севере и северо-востоке территории исследования (хр. Улан-Бургасы, бассейн р. Курбы в нижнем течении, Кижингино-Кудунская впадина и др.) выделены ММП прерывистого типа распространения [7]. Преимущественно сплошной тип распространения ММП выделяется в пределах южной части Витимского плоскогорья, относящейся к бассейну р. Уды [10].

Перечисленные особенности природы территории определяют интенсивность развития наледных процессов. Их изучение проводилось дистанционными и полевыми экспедиционными методами с применением полустационарных наблюдений. Данные космической съемки Landsat-4-5, Landsat-8 (пространственное разрешение 30 м) и Sentinel-2 (10 м) использовались при картографировании наледей, которое проведено на основе анализа значений NDSI (нормализованный снежно-ледовый индекс) [11] по применяемому для этих целей алгоритму, описанному в работах [12–14], с последующей ручной оцифровкой (комбинированный метод дешифрирования). На основе снимков Sentinel-2 составлена карта текущего расположения наледей (по состоянию на 2023 г.), с использованием снимков Landsat-4-5, Landsat-8 ретроспективные карты, за период с 1997 по 2022 гг. Также на предварительном этапе с использованием данных цифровой модели рельефа SRTM составлена детальная карта

гидрографической сети и выделены наледные бассейны III–VI порядков (VI – бассейн р. Уды). Для определения особенностей распределения наледей с использованием данных SRTM проведен детальный ГИС-анализ рельефа территории.

На ключевых участках, охватывающих отдельные наледные бассейны (II порядка), для расчета объемов и выявления закономерностей в изменении мощности наледей в зависимости от расположения в рельефе и ландшафтных условий в 2021–2023 гг. проведены наледные съемки на 25 объектах. Выполнена съемка наледей при их максимальном развитии (март) и наледных полей (сентябрь) с борта БПЛА с дополнительной наземной привязкой. Расчет суммарного объема наледей производился путем интегрального анализа с применением данных по площадям (получены при картографировании) и средней мощности наледей (получены в процессе наледных съемок).

В задачи полустационарных наблюдений (2021–2023 гг.) входило установление основных метеорологических параметров среды в районах расположения наледей. При помощи автоматических термометрических датчиков фиксировались температура воздуха в период формирования и разрушения наледей (с сентября по июль), особенности сезонного промерзания горных пород. Расчетными методами, а также с применением автоматической фотофиксации (фотоловушки) устанавливалась скорость таяния наледей.

Результаты исследования и их обсуждение

В настоящее время в пределах территории бассейна р. Уды в холодный период года формируется 2,2 тыс. наледей (рис. 2). В это число входят все наледи, площадь которых больше 3600 м^2 (4 пиксела снимка Landsat с разрешением 30 м). Суммарная площадь наледей в 2023 г. составила $101,7 \text{ км}^2$, относительная наледность – 0,29 %. По размерам 1643 наледи относятся к большим, 321 – к средним и 239 – к очень большим [15]. Гигантских, площадью более 1 км^2 , в настоящее время не выявлено. Подавляющее большинство наледей (1800, или 84 %) образуются в горных районах территории (бассейны трещинных вод).

Мощность наледей различается в зависимости от природных особенностей районов их формирования. В отрогах средневысотных горных хребтов, в узких ложбинах с небольшими ручьями, в условиях преобладания природных комплексов горной тайги средняя мощность наледей составляет около 0,7 м, максимальная достигает 1,5 м. У подножий склонов хребтов, занятых лесными подтаежными ландшафтами, в долинах малых рек в их верхнем течении накапливаются наледи со средней толщиной льда до 0,9 м, максимальная составляет 1,8 м.

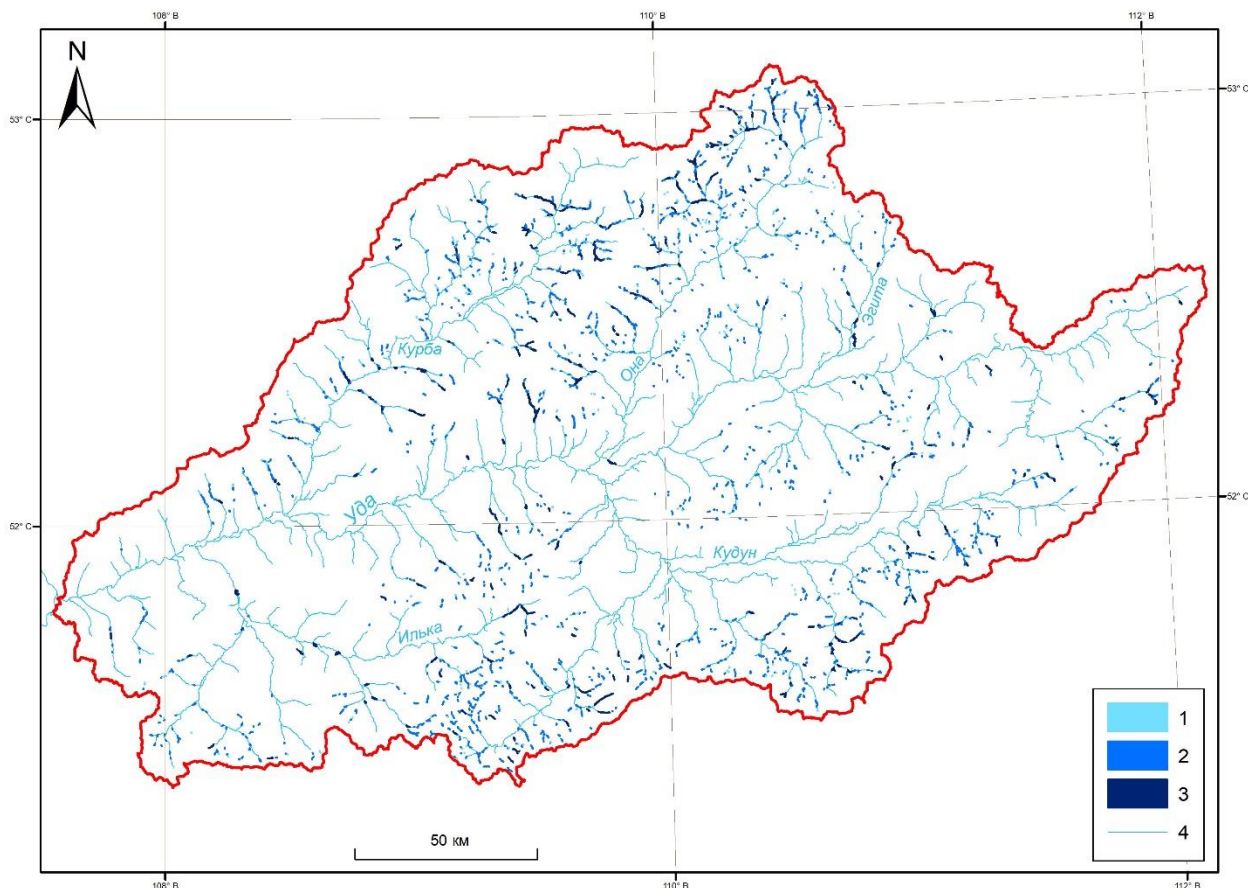


Рис. 2. Распространение наледей в бассейне р. Уды весной 2023 г.: 1 – средние, 2 – большие, 3 – очень большие, 4 – речная сеть

Fig. 2. Distribution of icings in the Uda river basin in spring of 2023: 1 – medium, 2 – large, 3 – very large, 4 – river network

Наибольшая средняя мощность наледей характерна для участков долин в среднем течении малых рек (1,5–1,7 м), в нижнем течении в устьевых частях речных долин средняя мощность наледей составляет 1,3 м (лесосостепь и степь). Наледи со средней мощностью более 2 м редкость, хотя и встречаются во всех перечисленных условиях. Исходя из распределения наледей по указанным природным комплексам, их суммарный объем в период максимального развития составляет около 0,8 км³.

Наледи речных вод немногочисленны. В 2023 г. они формировались на реках Брянке, Ильке, Эгите (Поперечная), в верховьях р. Курбы. Руслу этих рек (за исключением р. Курбы) неглубокие (до 2 м), высота берегов между урезом воды и поймой не достигает и 1 м, поэтому наледи распространяются за пределы русел, затапливая поймы, и таким образом успешно дешифрируются. На территории преобладают наледи подземных вод, накапливающиеся в долинах малых рек, вдоль русел ручьев, у родников. Некоторые из них достигают площади 1 км². Отличительной особенностью является межгодовая изменчивость в расположении многих наледей, т. е. по зональным признакам они относятся к южному

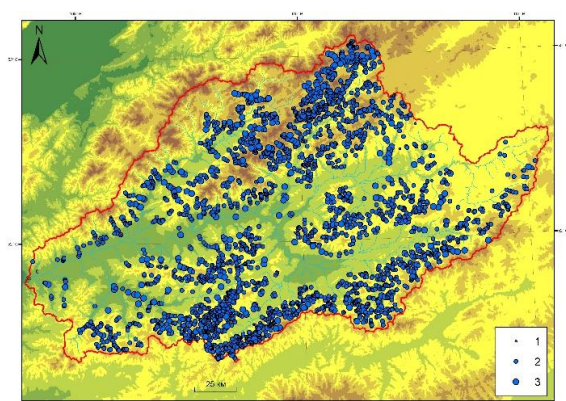
типу [16]. Питание происходит в основном за счет грунтовых вод. Часть наледей сохраняет свое местоположение ежегодно, хотя площади и объемы их постоянно меняются. Они относятся к умеренному типу. Сравнение разновременных карт, построенных по ретроспективным снимкам Landsat, показывает, что в пределах территории исследования насчитывается до 1100 таких наледей. В их питании кроме грунтовых вод участвуют подземные воды глубокой циркуляции. Наледей северного типа на территории не выявлено.

Наблюдения с использованием температурных датчиков, анализ данных метеостанций показывают, что в современных природно-климатических условиях формирование первых наледей начинается в начале–середине декабря с установлением среднесуточной температуры воздуха –15 °С и ниже. С момента перехода среднесуточной температуры через 0 °С до этого времени русла небольших водотоков постепенно перемерзают, речной сток пополняет запасы воды подруслового и пойменного аллювия. При промерзании горных пород в пойме подземные воды выходят на дневную поверхность, образуя наледи. Увеличение интенсивности

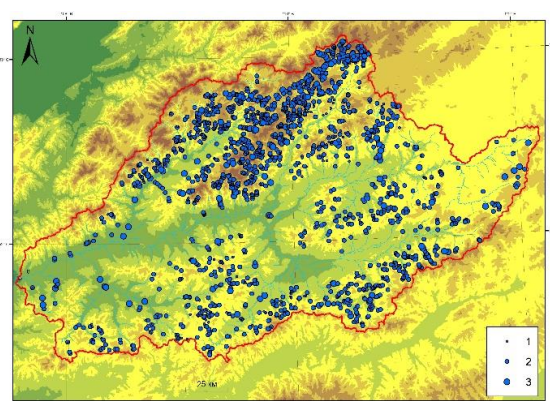
наледных процессов начинается в январе, максимум приходится на середину февраля. Связано это с промерзанием горных пород в слое сезонного промерзания–оттаивания на максимальную глубину и сужением водопрпускной способности водоносных горизонтов, в которых происходит циркуляция подземных вод. Таяние наледей начинается в конце марта. Скорость таяния зависит от метеорологических условий и в среднем составляет от 9 см/сут в степном и лесостепном поясах до 1,2 см/сут в лесном. В горных районах, в условиях таежных ландшафтов, таяние наледей заканчивается в начале июля. Таким образом, многолетних наледей на территории нет.

Разновременные карты расположения наледей, составленные на основе данных космической съемки, позволили выявить пространственно-временные различия в относительной наледности бассейна р. Уды (рис. 3).

Количество, площади и объемы наледей меняются из года в год. В рассматриваемом временном отрезке максимум интенсивности наледных процессов приходился на 2000 г. Общее количество наледей в пределах территории исследования тогда составляло 3221, суммарная площадь – 168 км², относительная наледность – 0,48 %. Минимальная интенсивность наледных процессов наблюдалась в 2017 г. В бассейне р. Уды насчитывалось 1887 наледей суммарной площадью 78 км². Относительная наледность составляла 0,22 %. Результаты ретроспективного картографирования подтверждают, что в многоводные климатические циклы общая относительная наледность территории увеличивается, в маловодные – сокращается (рис. 3). Наличие запасов подземных вод, накопление которых зависит от осадков теплого сезона года, в значительной степени предопределяет потенциальные объемы наледей (рис. 4, а).



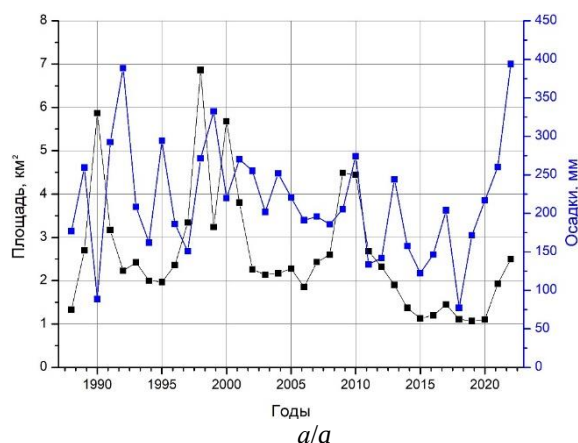
а/а



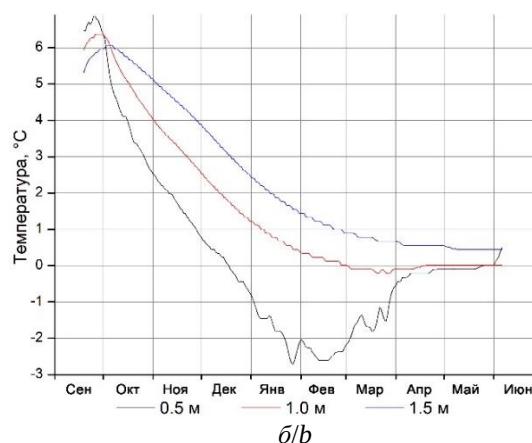
б/б

Рис. 3. Динамика наледей: а) 2000 г.; б) 2017 г. Наледи: 1 – средние, 2 – большие, 3 – очень большие

Fig. 3. Dynamics of icings: а) 2000; б) 2017. Icings: 1 – medium, 2 – large, 3 – very large



а/а



б/б

Рис. 4. Динамика площадей наледей (на ключевом участке) в сравнении с количеством осадков предшествующего теплого периода года (а) и динамика температуры в слое сезонного промерзания на ключевом участке исследования (б) в период развития наледей в 2022–2023 гг.

Fig. 4. Dynamics of the areas of icings in the key study area in comparison with the amount of precipitation of the previous warm period of the year (а) and the dynamics of temperature in the layer of seasonal freezing in the key study area (б) during the period of icings development in 2022–2023

Важным фактором, влияющим на интенсивность образования наледей, является температура воздуха, так как она определяет время начала наледных процессов, глубину и интенсивность промерзания горных пород. Наблюдения с использованием автоматических регистраторов показывают, что в условиях относительно теплой зимы, когда температура воздуха в пределах территории исследования не опускается ниже -35°C , глубина слоя сезонного промерзания составляет не более 1,4 м, при температуре пород $-2,8^{\circ}\text{C}$ (рис. 4, б). В холодные зимы, когда температура воздуха опускается ниже -40°C , а значения от -35 до -40°C наблюдаются в течении нескольких дней, горные породы промерзают на глубину 2,3–2,5 м, температура горных пород составляет $-6,5^{\circ}\text{C}$. При глубоком промерзании горных пород выше вероятность смыкания сезонной и многолетней мерзлоты, увеличиваются объемы грунтовых вод, выходящих на дневную поверхность. Важную роль при этом играет ход температуры воздуха. Чередование похолоданий и оттепелей в зимний период приводит к увеличению интенсивности наледообразования. Эта закономерность, проявляющаяся во многих районах формирования наледей [17, 18], характерна и для бассейна р. Уды.

Таким образом, межгодовые различия в наледности бассейна р. Уды объясняются разностью в количестве осадков и ходом температуры воздуха в период формирования наледей, что согласуется с имеющимися представлениями о влиянии метеорологических факторов среды на интенсивность наледных процессов в Забайкалье [1].

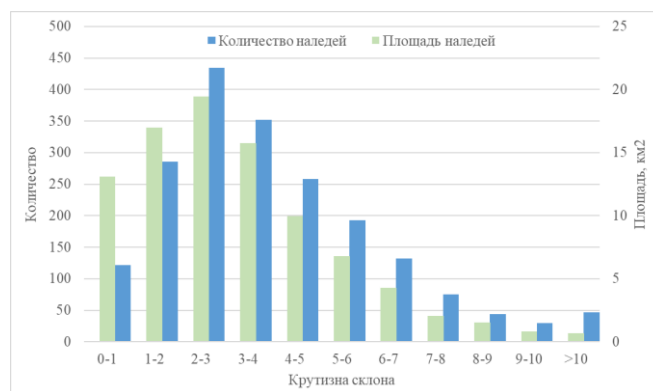
Разновременные карты дают представления о пространственных различиях в распространении наледей. В северной части территории, где формируется сток рек Курбы и Оны (около 9 тыс. км²), преобладает горный рельеф (хр. Улан-Бургасы, Зусы и др.), а ММП имеют массивно-островное

распространение (с переходом к сплошному), наледность в разные годы варьирует от 0,47 до 0,72 %, т. е. изменяется в 1,5 раза и остается стабильно высокой (рис. 3). В южной части территории исследования относительная наледность меняется в более широких пределах. Для бассейна р. Кудун (IV порядка) площадью около 8 тыс. км² в годы с малым количеством осадков этот показатель составляет 0,16 %, в многоводные возрастает до 0,53 %, т. е. изменяется более чем в 3 раза. Горные хребты здесь ниже, чем в северной части (рис. 2), преобладают межгорные котловины, ММП имеют преимущественно островное распространение. Практически не меняется и остается достаточно низкой (около 0,10 %) относительная наледность восточной части территории исследования, которая располагается в пределах Витимского плоскогорья и для которой характерен сплошной тип распространения ММП.

Картографирование позволяет оценить роль рельефа (и тектоники), а также ММП в распределении наледей. Сопряженный анализ с использованием высотных данных SRTM и векторного слоя, содержащего сведения о наледях, показал, что в пределах районов с абсолютными высотами до 600 м отношение суммарной площади наледей к площади территории (относительная наледность) составляет 0,11 %, сравнительно небольшое значение. Также минимальная наледность характерна для приводораздельных частей склонов горных хребтов, с высотами более 1100 м. Здесь наледы практически не формируются из-за того, что подземные воды перемещаются по водоносным горизонтам в более пониженные элементы рельефа. В бассейне р. Уды максимальное количество наледей сосредоточено в высотном поясе 800–1000 м (наледность до 0,51 %), что вполне закономерно, так как здесь, в узких горных речных долинах у подножий склонов хребтов, происходит разгрузка подземных вод (рис. 5, а).



а/а



б/б

Рис. 5. Распределение наледей в рельефе в зависимости от: а) абсолютной высоты; б) крутизны склонов
Fig. 5. Icing distribution in the relief depending on: а) absolute height; б) slope steepness

Наибольшее число наледей формируется на склонах крутизной 2–3° в днищах впадин, по долинам малых рек. С увеличением крутизны склонов количество наледей и их площадь закономерно сокращается (рис. 5, б). С точки зрения экспозиции большинство наледей относится к восточным, юго-восточным и южным склонам. Здесь наледность изменяется от 0,4 до 0,5 %. Интересной особенностью является минимальная наледность на северных склонах (0,02 %), даже несмотря на то, что площадь склонов с такой экспозицией в бассейне р. Уды больше других на 350–750 км². Это связано с недостаточным притоком солнечной радиации, особенно в холодный период года, из-за чего горные породы промерзают сильнее, чем на освещенных склонах, а потому возможности выхода на поверхность подземных вод ограничены.

Сравнение ретроспективных карт распределения наледей с картой распространения ММП (рис. 1) показывает, что низкая относительная наледность характерна для районов с редкоостровным (межгорные котловины и низкогорные хребты на западе) и преимущественно сплошными типами распространения ММП (Витимское плоскогорье). В южной части территории наледность изменяется в широких пределах – это районы островного распространения ММП, всегда высокой наледностью отличаются горные районы севера бассейна, где преобладают ММП массивно-островного типа распространения.

Геоинформационный анализ с использованием данных [9], полевых экспедиционных исследований и результатов картографирования позволил выделить на территории бассейна р. Уды наледи, различающиеся по генезису, источникам питания, связанные с некоторыми типами таликов (рис. 6).

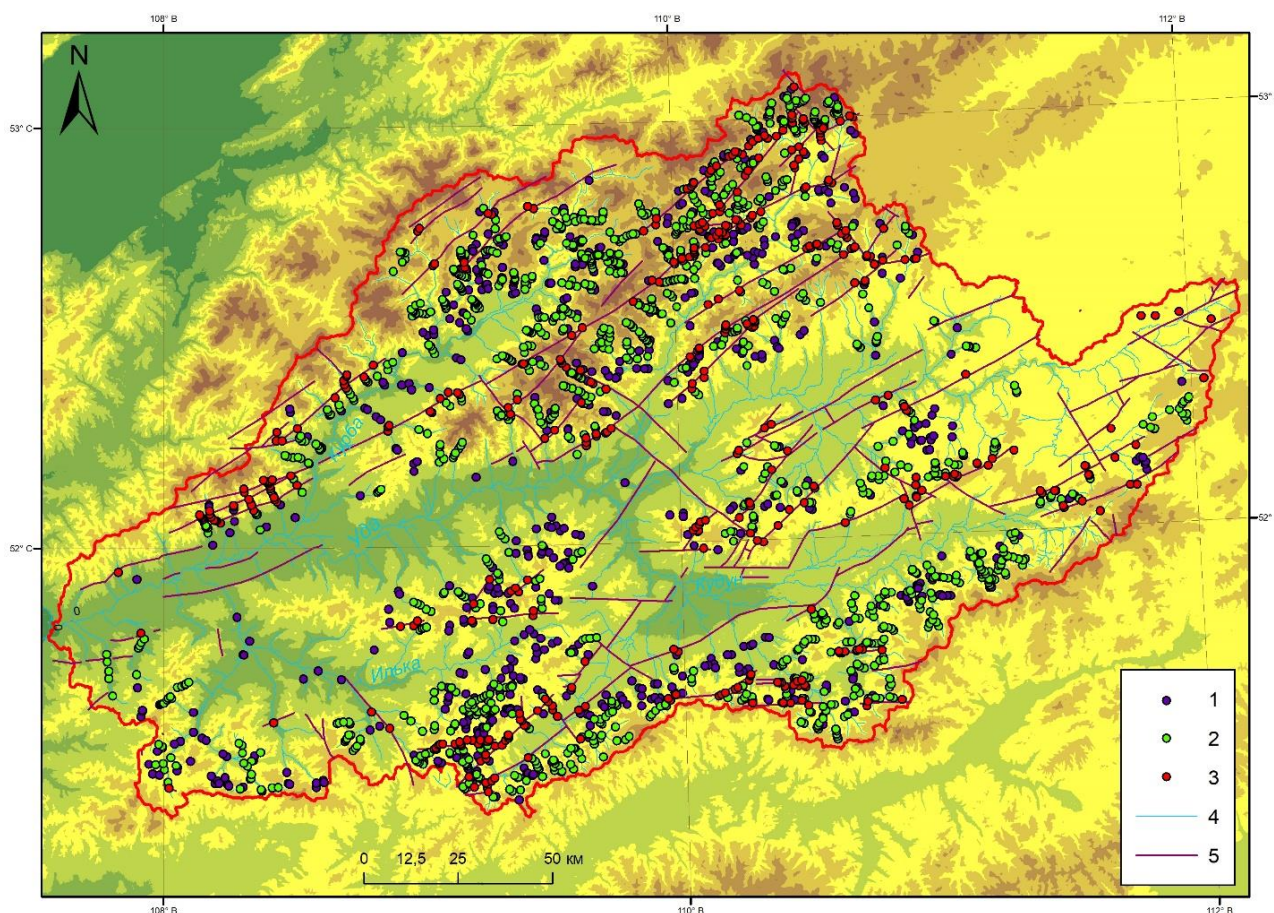


Рис. 6. Наледи бассейна р. Уды по источникам питания и взаимосвязи с таликовыми зонами: 1 – наледи грунтовых вод, связанные с надмерзлотными таликами, радиационными, прирусловыми или подрусловыми; 2 – наледи со смешанным питанием, с преобладанием доли грунтовых вод, связанные с грунтово-фильтрационными таликами; 3 – наледи с высокой долей питания за счет подземных вод глубокой циркуляции, трещинно-жилльных вод, связанные с гидрогеогенными напорно-фильтрационными таликами в зонах разломов

Fig. 6. Icings of the Uda River basin by sources of supply and interrelation with talik zones: 1 – groundwater icings connected with subpermafrost, radiation, near-channel or under-channel taliks; 2 – mixed-feeding icings with predominant groundwater share connected with groundwater-infiltration taliks; 3 – icings with high share of feeding due to groundwater of deep circulation, fracture vein water connected with hydrogeogenic pressure-infiltration taliks in fault zones

Для этого векторные данные по расположению наледей в разные годы сравнивались в ArcGIS Desktop, методом пересечения полигонов устанавливались наледи, ежегодно формирующиеся в одних и тех же местах (умеренный тип), а также мигрирующие вдоль русел (южный тип). Стабильность в расположении наледей вдоль тектонических нарушений позволяет говорить о разгрузке подземных вод глубокой циркуляции.

Преобладание несплошной криолитозоны в условиях расчлененного рельефа и сравнительно небольшая мощность слоя сезонного промерзания (оттаивания) предопределяют особенности питания наледей бассейна р. Уды. В большинстве случаев наледи формируются при разгрузке грунтовых вод первого от поверхности водоносного горизонта в процессе сезонного промерзания горных пород. Не менее 29 % наледей территории имеют такой генезис (рис. 6). В районах, где ММП преобладают над тальмами, они связаны с надмерзлотными таликами, радиационными, прирусловыми или подрусовыми.

В районах, где по геолого-геоморфологическим, гидрогеологическим и геокриологическим условиям в холодный период года происходит смыкание слоя сезонного промерзания и водоупорных пород (в т. ч. ММП), наблюдается формирование таких наледей. Чаще всего это долины малых рек. Наледи при этом имеют достаточно большие площади (более 100 тыс. м²) и объемы, меняют из года в года свое местоположение (наледи южного типа).

В районах с горным расчлененным рельефом, отличающихся сложной тектоникой, в местах расположения островов ММП, большую роль играет приток воды из зон трещиноватости в коренных породах, из подмерзлотных и межмерзлотных таликов [16]. В таких случаях наряду с грунтовыми водами долю в питание наледей вносят подземные воды глубоких водоносных горизонтов. О наличии источников глубинных подземных вод с дебитом до 20 л/с в хр. Улан-Бургасы, Зусы и др. упоминается в работе [19]. Смешанное питание с преобладанием доли грунтовых вод характерно не менее чем для 50 % наледей бассейна р. Уды (около 1150 по данным на 2023 г.). Они связаны с грунтово-фильтрационными таликами в среднегорьях с массивно-островным типом распространения ММП. Наледи располагаются в днищах узких речных долин, в распадах вдоль ручьев. Геологическое строение и морфология долин водотоков в среднегорных хребтах территории определяют особенности передвижения подземных вод в водоносных горизонтах под поверхностью. Сток осуществляется по крутым склонам к днищам V-образных или ящикообразных долин малых рек или ручьев. Рыхлые отложения таких долин представлены маломощным аллювием, зачастую днища заполнены грубообломочными, в т. ч. глыбовыми,

склоновыми отложениями, иногда селевыми. Водоупорными горизонтами в таких долинах выступают коренные кристаллические горные породы, весь сток со склонов сосредоточен в рыхлых отложениях, которые в холодный период года промерзают, но за счет многочисленных пустот вода выходит на поверхность. Отличительной особенностью описанных районов является расположение наледей цепочками вдоль русел водотоков, начиная от привершинных частей склонов до устьевых участков речных долин.

Часть наледей территории формируется в районах развития гидрогеогенных напорно-фильтрационных таликов в зонах разломов. В 2023 г. таких на территории насчитывалось 450 (или около 21 %). При анализе учитывались лишь достоверно установленные разломы из [9]. Около половины наледей, связанных с тектоническими нарушениями, расположены у подножий горных хребтов, где происходит разгрузка вод трещинных бассейнов, вторая половина формируется в горах у источников, которые дают начало постоянным водотокам. В питании таких наледей участвуют подмерзлотные подземные воды глубокой циркуляции.

Выделение источников питания и отнесение наледей бассейна р. Уды к зонам развития разных типов таликов отличается определенной условностью и требует дополнительных исследований, так как природные, в т. ч. мерзлотно-геологические, условия территории весьма разнообразны. Кроме того, использование геоинформационных методов ограничено объемами баз данных, имеющихся в распоряжении. Это касается, в частности, сведений о геологии, тектонике и геокриологии. На геологических картах обозначено значительно больше разрывных нарушений, чем есть в оцифрованных базах данных, распространение ММП не всегда совпадает с имеющимися данными, существуют разные схемы.

Наледи являются естественным хранилищем подземных вод на поверхности. В Забайкалье воду наледей традиционно использовали для орошения сенокосов [20]. Подобная необходимость возникала по причине нехватки воды поверхностных водотоков и ограниченного использования подземных вод [5]. Начало вегетационного периода растений приходится на наиболее засушливые месяцы (май – начало июня), когда осадков на территории выпадает не более 10–15 мм (по м/с Новая Курба), поэтому необходимость в воде крайне велика. Наледи, формирующиеся по долинам малых рек, при таянии фактически обеспечивают их сток [21], часть которого используется (забирается) оросительными системами. Отдельные наледи в разных частях бассейна р. Уды накапливаются искусственно, путем перекрытия русел небольших водотоков и отведения воды на сенокосы, и в настоящее время (рис. 7).



a/a



б/б

Рис. 7. Использование наледи как источника водоснабжения в сельском хозяйстве: а) оросительный канал для забора воды при таянии наледи у подножья хр. Улан-Бургасы; б) искусственно накопленная наледь на сенокосе в долине р. Воровки

Fig. 7. Using icings as a source of water supply in agriculture: a) an irrigation canal for collecting water when the icing melts at the foot of the Ulan-Burgasy ridge; b) artificially accumulated icing in hayfields in the Vorovka river valley

Учитывая современные тенденции развития сельского хозяйства, выражающиеся в увеличении поголовья скота, площадей сенокосов и пашни, данный опыт использования наледей в бассейне р. Уды в народно-хозяйственных целях целесообразно тиражировать.

Заключение

По результатам исследования выявлено, что в бассейне р. Уды в холодный сезон года образуется до 2,2 тыс. наледей, преимущественно подземных вод. Комплексными работами, включавшими картографирование и полевые наблюдения, установлено, что около 30 % из них формируется за счет выхода на поверхность грунтовых вод при сезонном промерзании горных пород. Об этом свидетельствуют сравнительно небольшие размеры таких наледей и их зависимость от метеорологических факторов среды, в частности от количества осадков теплого сезона года, предшествующего периоду образования наледей. До 1100 наледей ежегодно наблюдаются в одних и тех же местах, что связано с геолого-геоморфологическими и гидрогеологическими особенностями районов их формирования. В питании таких наледей участвуют подмерзлотные подземные воды глубоких водоносных горизонтов, разгрузка которых происходит по сквозным таликам, в т. ч. в зонах разломов. Питание большинства наледей комплексное, а изучение доли разных источников (грунтовые воды, межпластовые подмерзлотные и т. д.) – важная задача будущих исследований, так как они позволяют оценить запасы подземных вод, определить возможности их использования и предусмотреть ме-

роприятия по защите от наледей населенных пунктов и объектов инфраструктуры.

В многоводные климатические циклы площади и объемы наледей в бассейне р. Уды увеличиваются в 2 раза по сравнению с маловодными, т. е. наблюдается цикличность синхронная изменению общего увлажнения. Выраженных направленных трендов в динамике интенсивности развития наледей не выявлено, вместе с тем наблюдается увеличение количества средних наледей и сокращение числа очень крупных.

Согласно современным представлениям наледи, как объекты криосферы, являются маркерами изменения состояния криолитозоны. Это подтверждается многолетними исследованиями, проводимыми в районах со сплошным типом распространения ММП [3, 22]. Важным и не изученным до конца остается вопрос о том, как наблюдаемое на сегодняшний день по всему северному полушарию Земли увеличение температур воздуха влияет на сезонную и многолетнюю мерзлоту на южной границе криолитозоны [18]. Изучение наледей южной геокриологической зоны поможет найти ответ на данный вопрос. Вместе с тем требуется расширение территориальных границ исследования. Связано это с необходимостью более детального анализа влияния различных факторов на интенсивность наледных процессов. В частности, в бассейне р. Уды особенности тектоники определяют разгрузку подземных вод там, где высока концентрация разломных структур, а потому и наледей в таких районах больше. В этой связи интересно рассмотреть территории, отличающиеся по геолого-геоморфологическим и другим особенностям.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шестернев Д.М., Верхотуров А.Г. Наледи Забайкалья. – Чита: ЧитГУ, 2006. – 212 с.
2. The distribution and dynamics of aufeis in permafrost regions / T. Epsom, O. Makarieva, P. Morse, D. Kane, V. Alekseev, P. Marsh // *Permafrost and Periglacial Processes*. – 2020. – № 31. – P. 383–395.
3. Наледи-тарыны Северо-Востока России по историческим данным / В.Р. Алексеев, О.М. Макарьева, Н.В. Нестерова, А.А. Землянскова, А.Н. Шихов, А.А. Осташов // *Арктика и Антарктика*. – 2021. – № 4. – С. 75–118.
4. Марков М.Л., Василенко Н.Г., Гуревич Е.В. Наледи зоны БАМ: экспедиционные исследования. – СПб.: Нестор-История, 2016. – 320 с.
5. Кибанов Г.А., Хандалов В.И., Хараев П.Х. Использование грунтовых вод в земледелии Бурятии и проблемы строительной индустрии. – Улан-Удэ: Изд-во Бурятского статистического управления, 1980. – 40 с.
6. Circum-arctic map of permafrost and ground-ice conditions. Version 2 / J. Brown, O. Ferrians, J.A. Heginbottom, E. Melnikov. – Boulder, Colorado USA. NSIDC: National Snow and Ice Data Center, 2002. URL: <https://nsidc.org/data/ggd318> (дата обращения 20.07.2023).
7. Гидрогеология СССР. Т. XXII. Бурятская АССР / под ред. А.И. Ефимова. – М.: Недра, 1970. – 432 с.
8. Черемных А.В. Парагенезы разрывов в крупных разломных зонах Западного Забайкалья // *Геодинамика и тектонофизика*. – 2018. – Т. 9. – № 3. – С. 889–908. DOI: 10.5800/GT- 2018- 9- 3- 0375
9. ГИС-пакеты оперативной геологической информации. URL: <http://atlaspacket.vsegei.ru/> (дата обращения: 25.09.2022).
10. Мельничук Н.Л. Геокриологические условия южной части Витимского плоскогорья / под. ред. И.А. Некрасова. – М.: Наука, 1967. – С. 70–78.
11. Hall D.K., Riggs G.A., Salomonson V.V. Development of methods for mapping global snow cover using moderate resolution imaging spectroradiometer data // *Remote Sens. Environ.* – 1995. – Vol. 54. – P. 127–140. DOI: 10.1016/0034-4257(95)00137-P
12. Наледи бассейна реки Индигирка по современным снимкам Landsat и историческим данным / О.М. Макарьева, А.Н. Шихов, А.А. Осташов, Н.В. Нестерова // *Лёд и снег*. – 2019. – Т. 59. – № 2. – С. 201–212.
13. Brombierstäudl D., Schmidt S., Nüsser M. Distribution and relevance of aufeis (icing) in the Upper Indus Basin // *Science of the Total Environment*. – 2021. – Vol. 780. – P. 1–12. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.146604
14. The formation of aufeis and its impact on infrastructure around Ulaanbaatar, North-Central Mongolia / M. Walther, V. Batsaikhan, A. Dashtseren, Y. Jambaljav, K. Temujin, G. Ulanbayar, U. Kamp // *Erforschung biologischer resourcen der Mongolei*. – 2021. – Vol. 14. – P. 385–398.
15. Петров В.Г. Наледи на Амурско-Якутской магистрали, с альбомом планов наледей. – Л.: Изд-во АН СССР и НИАДИ НКПС СССР, 1930. – 177 с.
16. Романовский Н.Н. О геологической деятельности наледей // *Мерзлотные исследования*. Выпуск XIII. – М.: Изд-во МГУ, 1973. – С. 66–89.
17. Morse P.D., Wolfe S.A. Geological and meteorological controls on icing (aufeis) dynamics (1985 to 2014) in subarctic Canada // *Journal of Geophysical Research F: Earth Surface*. – 2015. – № 120. – P. 1670–1686. DOI: 10.1002/2015JF003534
18. Morse P.D., Wolfe S.A. Long-term river icing dynamics in discontinuous permafrost, subarctic Canadian shield // *Permafrost and Periglacial Processes*. – 2017. – № 28. – P. 580–586. DOI: 10.1002/PPP.1907
19. Вельмина Н.А. Особенности гидрогеологии мерзлотной зоны литосферы. – М.: Недра, 1970. – 328 с.
20. Орошение лугов Сибири с использованием воды, накопленной в наледи / А.Б. Бутуханов, С.Ч. Содбоева, Р.М. Бутуханов, Т.Д. Намдакова, Т.Б. Тодорхоева, Б. Ганчимэг // *Кормопроизводство*. – 2016. – № 12. – С. 21–24.
21. Reedyk S., Woo M., Prowse T. Contribution of icing ablation to stream flow in a discontinuous permafrost area // *Canadian Journal of Earth Sciences*. – 1995. – № 32. – P. 3–20.
22. Pavelsky T.M., Zarnetske J.P. Rapid decline in river icings detected in Arctic Alaska: implications for a changing hydrologic cycle and river ecosystems // *Geophysical Research Letters*. – 2017. – № 44. – P. 3228–3235. URL: <https://doi.org/10.1002/2016GL072397> (дата обращения 15.10.2023).

Информация об авторах

Владимир Николаевич Черных, младший научный сотрудник лаборатории геоэкологии Байкальского института природопользования СО РАН, Россия, 670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 8. geosibir@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0001-9365-7340>

Баир Зугдырович Цыдыпов, кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории геоэкологии Байкальского института природопользования СО РАН, Россия, 670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 8. bz61@binm.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8340-7268>

Батор Валерьевич Содномов, младший научный сотрудник лаборатории геоэкологии Байкальского института природопользования СО РАН, Россия, 670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 8. sodnomov@binm.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4099-7226>

Александр Андреевич Аюржанаев, кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории геоэкологии Байкальского института природопользования СО РАН, Россия, 670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 8. aaayurzhanaev@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2282-7848>

Маргарита Андреевна Жарникова, кандидат географических наук, научный сотрудник лаборатории геоэкологии Байкальского института природопользования СО РАН, Россия, 670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 8. zharnikova@binm.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3428-6724>

Баир Олегович Гуржапов, ведущий инженер лаборатории геоэкологии Байкальского института природопользования СО РАН, Россия, 670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 8. bair.gurzhapov@yandex.ru

Ендон Жамьянович Гармаев, доктор географических наук, член-корреспондент РАН, директор Байкальского института природопользования СО РАН, Россия, 670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 8. garmaev@binm.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8524-4930>

Поступила в редакцию: 20.10.2023

Поступила после рецензирования: 26.04.2024

Принята к публикации: 19.06.2024

REFERENCES

1. Shesternev D.M., Verkhoturov A.G. *Icings of Transbaikalia*. Chita, ChitGU, 2006. 212 p. (In Russ.)
2. Epsom T., Makarieva O., Morse P., Kane D., Alekseev V., Marsh P. The distribution and dynamics of icings in permafrost regions. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2020, no. 31, pp. 383–395.
3. Alekseev V.R., Makarieva O.M., Nesterova N.V., Zemlyanskova A.A., Shikhov A.N., Ostashov A.A. Icings-taryns of the North-East of Russia according to historical data. *Arctic and Antarctic*, 2021, no. 4, pp. 75–118. (In Russ.)
4. Markov M.L., Vasilenko N.G., Gurevich E.V. *Icings of the BAM zone: expeditionary research*. St. Petersburg, Nestor-History Publ., 2016. 320 p. (In Russ.)
5. Kibanov G.A., Khandalov V.I., Kharaev P.Kh. *The use of groundwater in agriculture in Buryatia and the problems of the construction industry*. Ulan-Ude, Buryat statistical department Publ. house, 1980. 40 p. (In Russ.)
6. Brown J., Ferrians O., Heginbottom J.A., Melnikov E. *Circum-Arctic Map of Permafrost and Ground-Ice Conditions. Version 2*. Boulder, Colorado USA. NSIDC: National Snow and Ice Data Center, 2002. Available at: <https://nsidc.org/data/ggd318> (accessed 20 July 2023).
7. *Hydrogeology of the USSR. Vol. XXII. Buryat ASSR*. Ed. by A.I. Efimov. Moscow, Nedra Publ., 1970. 432 p. (In Russ.)
8. Cheremnykh A.V. Parageneses of fractures in large fault zones of west Transbaikalia. *Geodynamics and tectonophysics*, 2018, vol. 9, no. 3, pp. 889–908. DOI: 10.5800/GT- 2018- 9- 3- 0375 (In Russ.)
9. *GIS packages of operational geological information*. (In Russ.) Available at: <http://atlaspacket.vsegei.ru/> (accessed: 25 September 2022)
10. Melnichuk N.L. *Geocryological conditions of the southern part of the Vitim Plateau*. Ed. by I.A. Nekrasov. Moscow, Nauka Publ., 1967. pp. 70–78. (In Russ.)
11. Hall D.K., Riggs G.A., Salomonson V.V. Development of methods for mapping global snow cover using moderate resolution imaging spectroradiometer data. *Remote Sensing of Environment*, 1995, vol. 54, pp. 127–140. DOI: 10.1016/0034-4257(95)00137-P
12. Makarieva O.M., Shikhov A.N., Ostashov A.A., Nesterova N.V. Ice deposits in the Indigirka River basin based on modern Landsat images and historical data. *Ice and snow*, 2019, vol. 59, no. 2, pp. 201–212. (In Russ.)
13. Brombierstäudl D., Schmidt S., Nüsser M. Distribution and relevance of aufeis (icing) in the Upper Indus Basin. *Science of the Total Environment*, 2021, vol. 780, pp. 1–12. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.146604.
14. Walther M., Batsaikhan V., Dashtseren A., Jambaljav Y., Temujin K., Ulanbayar G., Kamp U. The formation of aufeis and its impact on infrastructure around Ulaanbaatar, North-Central Mongolia. *Erforschung biologischer resourcen der Mongolei*, 2021, vol. 14, pp. 385–398.
15. Petrov V.G. *Aufeis on the Amur-Yakutsk highway, with an album of plans for aufeis*. Leningrad, AN SSSR I NIADI NKIS SSSR Pub., 1930. 177 p. (In Russ.)
16. Romanovsky N.N. On the geological activity of icings. *Permafrost studies*. Moscow, Moscow State University Publ. house, 1973. Iss. XIII, pp. 66–89. (In Russ.)
17. Morse P.D., Wolfe S.A. Geological and meteorological controls on icing (aufeis) dynamics (1985 to 2014) in subarctic Canada. *Journal of Geophysical Research F: Earth Surface*, 2015, 120, 1670–1686. DOI: 10.1002/2015JF003534
18. Morse P.D., Wolfe S.A. Long-term river icing dynamics in discontinuous permafrost, subarctic Canadian shield. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2017, vol. 28, pp. 580–586. DOI: 10.1002/PPP.1907.
19. Velmina N.A. *Features of the hydrogeology of the permafrost zone of the lithosphere*. Moscow, Nedra Publ., 1970. 328 p. (In Russ.)
20. Butukhanov A.B., Sodboeva S.Ch., Butukhanov R.M., Namdakova T.D., Todorkhoeva T.B., Ganchimeg B. Irrigation of Siberian meadows using water accumulated in ice. *Fodder production*, 2016, no. 12, pp. 21–24. (In Russ.)
21. Reedyk S., Woo M., Prowse T. Contribution of icing ablation to stream flow in a discontinuous permafrost area. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 1995, no. 32, pp. 13–20.
22. Pavelsky T.M., Zarnetske J.P. Rapid decline in river icings detected in Arctic Alaska: implications for a changing hydrologic cycle and river ecosystems. *Geophysical Research Letters*, 2017, no. 44, pp. 3228–3235. Available at: <https://doi.org/10.1002/2016GL072397> (accessed 15 October 2023).

Information about the authors

Vladimir N. Chernykh, Junior Researcher, Baikal Institute of Nature Management SB RAS, 8, Sakhyanova street, Ulan-Ude, 670047, Russian Federation. geosibir@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0001-9365-7340>

Bair Z. Tsydypov, Cand. Sc., Senior Researcher, Baikal Institute of Nature Management SB RAS, 8, Sakhyanova street, Ulan-Ude, 670047, Russian Federation. bz61@binm.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8340-7268>

Bator V. Sodnomov, Junior Researcher, Baikal Institute of Nature Management SB RAS, 8, Sakhyanova street, Ulan-Ude, 670047, Russian Federation. sodnomov@binm.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4099-7226>

Alexander A. Ayurzhanaev, Cand. Sc., Senior Researcher, Baikal Institute of Nature Management SB RAS, 8, Sakhyanova street, Ulan-Ude, 670047, Russian Federation. aaayurzhanaev@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2282-7848>

Margarita A. Zharnikova, Cand. Sc., Researcher, Baikal Institute of Nature Management SB RAS, 8, Sakhyanova street, Ulan-Ude, 670047, Russian Federation. zharnikova@binm.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3428-6724>

Bair O. Gurzhapov, Leading Engineer, Baikal Institute of Nature Management SB RAS, 8, Sakhyanova street, Ulan-Ude, 670047, Russian Federation. bair.gurzhapov@yandex.ru

Endon Z. Garmaev, Dr. Sc., Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Director, Baikal Institute of Nature Management SB RAS, 8, Sakhyanova street, Ulan-Ude, 670047, Russian Federation. garmaev@binm.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8524-4930>

Received: 20.10.2023

Revised: 26.04.2024

Accepted: 19.06.2024

УДК 622.831:550.34.03

DOI: 10.18799/24131830/2024/8/4420

Шифр специальности ВАК: 2.8.6

Региональный, локальный и текущий прогноз удароопасности участков угольного пласта на основе сейсмического мониторинга

Е.Е. Разумов^{1✉}, С.М. Простов², Е.А. Шабанов²

¹ Акционерное Общество «Научно-исследовательский институт горной геомеханики маркшейдерского дела – межотраслевой научный центр ВНИМИ», Россия, г. Санкт-Петербург

² Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева, Россия, г. Кемерово

✉razumov@vniimi.ru

Аннотация. *Актуальность* обусловлена недостаточной обоснованностью количественных критериев регионального, локального и текущего прогноза удароопасности разрабатываемых угольных пластов, отсутствием алгоритмов, увязывающих применение при прогнозе геофизических и прямых геомеханических методов. *Цель:* разработка комплексного метода геодинамического прогноза, включающего определение протяженности удароопасного участка, выявленного по результатам регионального прогноза по данным регистрации системы сейсмического мониторинга GITS, для проведения локального и текущего прогноза удароопасности нормативными методами. *Объект:* массив горных пород выемочного столба 4-1-5-7 шахты «Осинниковская» при ведении горных работ в зоне группы тектонических нарушений и пересечении передовой выработки. *Методы:* региональный геомеханический прогноз геофизическим методом регистрации сейсмической активности (система GITS), локальный (текущий) прогноз методами естественного электромагнитного излучения (аппаратура Ангел-М) и выход буровой мелочи. *Результаты.* Представлены результаты комплексных исследований в выемочном столбе 4-1-5-7 шахты «Осинниковская» по установлению корреляции между сейсмической активностью и параметрами напряженно-деформированного состояния массива. Было введено понятие интегральных показателей рассматриваемых параметров I_F и $I_{K\sigma}$, которые учитывают площадь зоны для i -го диапазона по комплексному параметру сейсмической активности F и коэффициенту концентрации вертикальных напряжений в кровле пласта K_σ . Установлено, что информативность интегральных показателей почти в два раза превышает информативность исходных параметров. Приведены экспериментальные номограммы $f(F_{\max}; x_F)$ и $f(I_F; x_F)$ для определения категории «ОПАСНО/НЕОПАСНО» при региональном прогнозе удароопасности по данным системы сейсмического мониторинга GITS. Разработан общий алгоритм прогноза удароопасности при ведении очистных работ, в котором применен комплексный подход, включающий региональный прогноз по регистрации сейсмической активности в пределах шахтного поля и методы локального прогноза как геофизические, так и прямые, для уточнения границ зон сейсмозергвыделения и подтверждения категории удароопасности. Представлен пример определения ширины зоны повышенного сейсмозергвыделения в ближайшей к сейсмоактивной зоне выработке. Показана динамика возникновения, развития и снижения зоны сейсмозергвыделения на рассматриваемых участках в горных выработках. Приведены примеры выполнения локального прогноза удароопасности на ранее установленных потенциально опасных участках методами регистрации естественного электромагнитного излучения горных пород и по выходу буровой мелочи.

Ключевые слова: система сейсмического мониторинга, геодинамические явления, горное давление, коэффициент концентрации напряжений, напряженно-деформированное состояние массива, математическое моделирование, расстояние до максимума опорного давления, локальный прогноз, естественное электромагнитное излучение горных пород, выход буровой мелочи

Для цитирования: Разумов Е.Е., Простов С.М., Шабанов Е.А. Региональный, локальный и текущий прогноз удароопасности участков угольного пласта на основе сейсмического мониторинга // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 8. – С. 174–186. DOI: 10.18799/24131830/2024/8/4420

UDC 622.831:550.34.03

DOI: 10.18799/24131830/2024/8/4420

Regional, local and current forecast of the impact hazard of coal seam sites based on seismic monitoring

E.E. Razumov^{1✉}, S.M. Prostov², E.A. Shabanov²

¹ Scientific Research Institute of Mining Geomechanics of Surveying – Intersectoral Research Center VNIMI, St. Petersburg, Russian Federation

² T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Kemerovo, Russian Federation

✉ razumov@vnimi.ru

Abstract. Relevance. Insufficient validity of the quantitative criteria of the regional, local and current forecast of the impact hazard of the coal seams being developed, the absence of algorithms linking the use of geophysical and direct geomechanical methods in forecasting. **Aim.** To develop a comprehensive method of geodynamic forecasting, including determining the extent of an impact-prone area identified by the results of a regional forecast based on the registration data of the GITS seismic monitoring system, for conducting local and current forecasts of impact hazard by regulatory methods. **Object.** An array of rocks of the excavation column 4-1-5-7 of the Osinnikovskaya mine during mining operations in the zone of a group of tectonic disturbances and the intersection of advanced workings. **Methods.** Regional geomechanical forecast by the geophysical method of seismic activity registration (GITS system), local (current) forecast by natural electromagnetic radiation methods (Angel-M equipment) and the output of drilling fines. **Results.** The paper introduces the results of complex studies in the excavation column 4 1-5-7 of the Osinnikovskaya mine to establish a correlation between seismic activity and the parameters of the stress-strain state of the array. The authors have introduced the concept of integral indicators of the considered parameters I_F and $I_{K\sigma}$. They take into account the area of the zone for the i -th range according to the complex parameter of seismic activity F and the coefficient of vertical stresses in the roof of the formation $K\sigma$. It is established that the informative value of the integral indicators is almost twice as high as the informative value of the initial parameters. Experimental nomograms $f(F_{\max}; X_F)$ and $f(I_F; X_F)$ are presented to determine the category "DANGEROUS/NON-DANGEROUS" for the regional forecast of impact hazard according to the GITS seismic monitoring system. The authors developed a general algorithm for predicting the impact hazard during clean-up operations. This algorithm uses an integrated approach that includes a regional forecast for recording seismic activity within the mine field and local forecasting methods, both geophysical and direct, to clarify the boundaries of seismic energy release zones and confirm the category of impact hazard. The paper introduces the example of determining the width of the zone of increased seismic energy release in the mine closest to the seismically active zone. The dynamics of the occurrence, development and decrease of the seismic energy release zone in the considered areas in the mine workings is shown. The authors give the examples of the implementation of a local forecast of impact hazard in previously established potentially dangerous areas by methods of recording natural electromagnetic radiation of rocks and by the output of drilling fines.

Keywords: seismic monitoring system, geodynamic phenomena, rock pressure, stress concentration coefficient, stress-strain state of the massif, mathematical modeling, distance to the maximum reference pressure, local forecast, natural electromagnetic radiation of rocks, output of drilling fines

For citation: Razumov E.E., Prostov S.M., Shabanov E.A. Regional, local and current forecast of the impact hazard of coal seam sites based on seismic monitoring. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 8, pp. 174–186. DOI: 10.18799/24131830/2024/8/4420

Введение

В соответствии с действующей инструкцией по прогнозу динамических явлений и мониторингу массива горных пород при отработке угольных месторождений [1] на угольных шахтах, склонных и опасных по горным ударам, необходимо осуществлять региональный, локальный и текущий прогноз удароопасности.

Для выполнения регионального прогноза применяются системы сейсмического мониторинга с целью выявления зон активизации сейсмических процессов при отработке удароопасных угольных пластов.

Для осуществления регионального прогноза в АО «ВНИМИ» разработана и успешно функционирует на угольных шахтах России и Казахстана система сейсмического мониторинга *GITS* (*geoinformation transmitting system*), состоящая из трехкомпонентных датчиков с преусилителями, выносных модулей телеметрии, базовых модулей телеметрии и программного обеспечения. Система *GITS* позволяет: своевременно выявлять зоны сейсмической активности в пределах шахтного поля; осуществлять прогнозирование горных и горнотектониче-

ских ударов в соответствии с действующей нормативной базой; вести регистрацию всех случаев динамических проявлений горного давления в толще отрабатываемых угольных пластов и вмещающих пород горного массива в районе контролируемых выработок; выявлять провоцирующее влияние природных факторов в их проявлении (например, предшествующих им сейсмических или геодинамических явлений) при расследовании ранее произошедших аварий геодинамической природы; производить автоматическое оповещение персонала шахт и рудников о зарегистрированных сильных сейсмических событиях [2, 3].

Для ведения локального прогноза удароопасности в Инструкции приняты следующие методы: на каменноугольных и антрацитовых пластах – по выходу буровой мелочи; на буроугольных пластах – по изменению естественной влаги угля; геофизические методы, основанные на регистрации сейсмоакустической активности, электромагнитных импульсов, амплитуды искусственно наведенного в угольном пласте электромагнитного поля [1].

Как правило, прямые методы недостаточно оперативны, трудоемки, не обеспечивают требуемой разрешающей способности и непрерывности мониторинга. Весьма интенсивно в последнее время развиваются геофизические методы, систематизация которых рассмотрена в работе [4]. Совершенствование геофизических методов идет в двух направлениях: расширение возможностей измерительной аппаратуры; развитие программно-методического обеспечения при обработке и интерпретации экспериментальных баз данных [5–9].

На шахтах Кузбасса и Сибири в настоящее время весьма активно применяются методы геоакустики, электромагнитного зондирования и георадиолокации. Примеры реализации этих методов при решении геомеханических проблем подземной геотехнологии следующие:

- внедрение системы акустического контроля состояния массива горных пород и прогноза динамических явлений САКСМ на шахтах АО «СУЭК-Кузбасс» (шахта «Им. С.М. Кирова» и др.) [10–12];
- применение георадара с антенным блоком «Тритон» при изучении мерзлого массива горных пород, георадара ОКО-2 с антенным блоком на центральной частоте 400 МГц в условиях шахты «Талдинская-Западная» при диагностировании расслоений в кровле подготовительной выработки [13–16];
- использование электрического зондирования аппаратурой «Ангел-М» с высокочастотным генератором в комплексе с видеоэндоскопическим обследованием при наблюдении зон расслоений, дробления и контроля фактических параметров

анкерной крепи (шахта «Березовская» и ШУ «Карагайлинское» [17, 18], шахта «Чертинская-Коксовая» [19, 20]).

В результате комплексных исследований в выемочном столбе 4-1-5-7 шахты «Осинниковская» по выявлению корреляции между сейсмической активностью и параметрами напряженно-деформированного состояния массива установлено, что при ведении очистных работ значение комплексного параметра сейсмической активности F , определяемого по результатам работы системы сейсмического мониторинга $GITS$ в пределах шахтного поля, и коэффициент концентрации вертикальных напряжений в кровле пласта $K_{\sigma\text{-верт.кр}}$ имеют общие тенденции к изменению.

Для проведения более точного сравнительного анализа были дополнительно определены интегральные показатели изменения рассматриваемых параметров, учитывающие не только их величины, но и размеры вовлекаемых зон при построении прогнозных карт. Было введено понятие интегральных показателей рассматриваемых параметров I_F и $I_{K\sigma}$, который учитывает площадь зоны для i -го диапазона по параметрам F и K_{σ} [21].

Результаты мониторинга представлены на рис. 1.

Было установлено, что информативность интегральных показателей почти в два раза превышает информативность исходных параметров (табл. 1).

Таблица 1. Информативность сейсмических и геомеханических параметров мониторинга

Table 1. Informative value of seismic and geomechanical monitoring parameters

Обозначение параметра Parameter designation	Описание параметра Parameter description	F	K_{σ}	I_F	$I_{K\sigma}$
J	Информативность параметра, бит Parameter informativeness, bits	0,612	0,57	0,927	1,322

Для повышения точности регионального прогноза удароопасности массива было предложено дополнительно определять расстояние x_i по нормали от очистного забоя до точки максимума информирующего параметра.

Накопленный банк экспериментальных данных позволил перейти к построению номограмм для прогноза удароопасности участков массива. Основная задача состояла в определении формы (уравнения) разграничительной линии и пороговых значений рассматриваемых параметров для категории «опасно». Решение задачи осложнялось тем, что на всех участках, на которых проводится сейсмический мониторинг, базовым методом прогноза по выходу буровой мелочи была получена категория «неопасно».

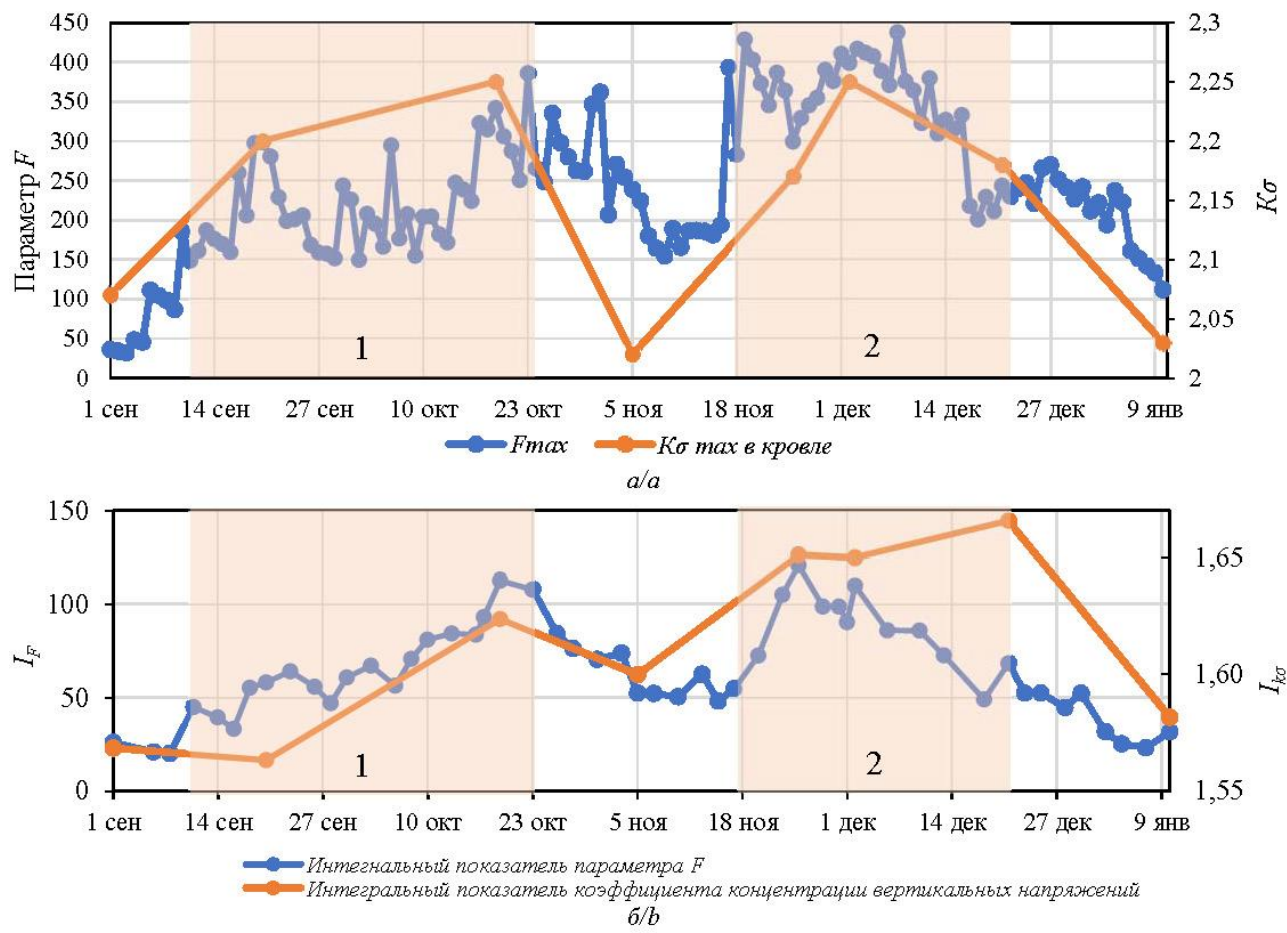


Рис. 1. Графики изменения максимальных значений коэффициента концентрации вертикальных напряжений в кровле пласта Е-5 $K_{\sigma-\text{max кр.}}$ и параметра F впереди забоя лавы (а) и интегральных показателей F и K_{σ} (б): 1 – перегруз очистным забоем группы тектонических нарушений; 2 – перегруз очистным забоем передовой выработки и тектонических нарушений

Fig. 1. Graphs of changes in the maximum values of the vertical stress concentration coefficient in the roof of the E-5 formation $K_{\sigma-\text{max кр.}}$ and the parameter F ahead of the lava face (a) and integral indicators F and K_{σ} (b): 1 – moving the group of tectonic disturbances by the treatment face; 2 – moving the advanced production and tectonic disturbances by the treatment face

Порядок построения состоял в следующем:

- на поле номограмм наносили расчетные точки с координатами (Π_{max} ; x_{Π});
- выбирали разграничительную линию, наиболее точно разделяющую зоны «опасно» и «неопасно», при этом наиболее подходящей оказалась линия показательной функции $y=f(\Pi_{\text{max}};x_{\Pi})=a^x$ (a – подбираемая константа);
- оценивали вероятность прогноза по соотношению «совпавших» точек к общему их количеству.

Экспериментальные номограммы $f(F_{\text{max}};x_F)$ и $f(I_F;x_F)$ приведены на рис. 2, а уравнения разграничительных линий экспериментальных номограмм с оценками вероятностей прогноза представлены в табл. 2.

Таблица 2. Уравнения разграничительных линий номограмм для рис. 2

Table 2. Equations of dividing lines of nomograms for Fig. 2

Уравнение Equation	Вероятность прогноза Forecast probability, %
$f(F,x)$	
$y = f(F,x) = \sqrt{x/35}$	95,3
$y = f(F,x) = \sqrt{x/42,5}$	91,5
$y = f(F,x) = \sqrt{x/60}$	88,4
$f(I_F,x)$	
$y = f(F,x) = \sqrt{x/25}$	95,2
$y = f(F,x) = \sqrt{x/30}$	90,4
$y = f(F,x) = \sqrt{x/35}$	88,1

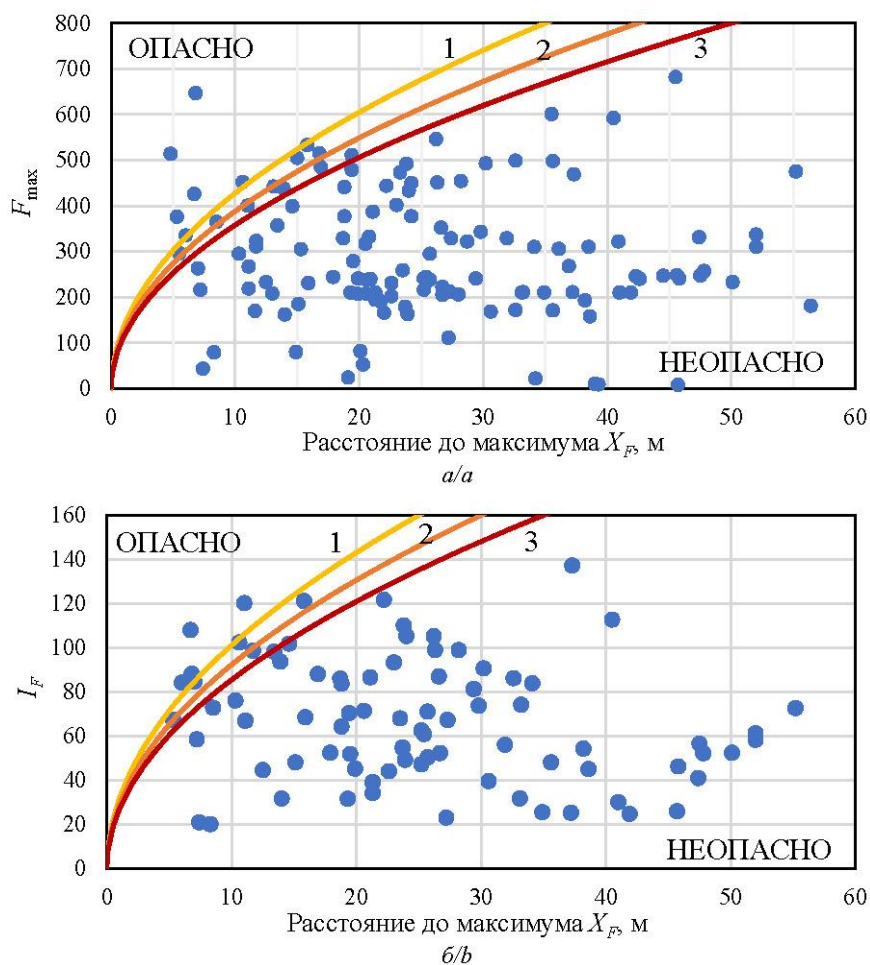


Рис. 2. Экспериментальные номограммы для прогноза удароопасности участков массива по данным сейсмического мониторинга $y=f(F_{\max};x_F)$ (а) и $y=f(I_F;x_F)$ (б); 1–3 – разграничительные линии

Fig. 2. Experimental nomograms for predicting the impact hazard of sections of the array according to seismic monitoring data $y=f(F_{\max};x_F)$ (a) and $y=f(I_F;x_F)$ (b); 1–3 – dividing lines

На основе результатов комплексных экспериментально-аналитических исследований предложено использовать для геодинамического прогноза удароопасности участков угольного пласта номограммы, включающие параметры, отражающие классические представления о механизме развязывания горных ударов: максимальные значения комплексного сейсмического параметра $F_{\max}$ (его интегральный показатель I_F) и расстояние x_F до точки со значением $F_{\max}$.

Методика проведения исследования

Для достижения поставленной цели разработан общий алгоритм прогноза удароопасности при ведении очистных работ. В алгоритме применен комплексный подход, включающий в себя региональный прогноз по регистрации сейсмической активности в пределах шахтного поля и методы локального прогноза, как геофизические, так и прямые, для уточнения границ зон повышенного сейсмоэнерговыведения и подтверждения категории удароопасности (рис. 3).

В соответствии с представленным алгоритмом прогноза удароопасности при ведении очистных работ первоначально на основе данных системы сейсмического мониторинга ведется региональный прогноз удароопасности (алгоритм на рис. 3, п. 1). По мере регистрации сейсмических событий выполняется их обработка с определением координат гипоцентра и выделившейся энергии в гипоцентре (п. 2). В результате обработки параметров сейсмособытий формируется база данных со всеми сейсмособытиями, зарегистрированными в пределах контролируемого участка (п. 3). При достаточном накоплении сейсмических событий в базе данных выполняется ежесуточное построение карт с изолиниями по параметру сейсмической активности F (п. 4). Дальнейшие шаги предусматривают определение точки максимума рассматриваемого параметра F на прогнозных картах и кратчайшего расстояния от этой точки до ближайшей открытой поверхности (борт подготовительно выработки, очистной забой), выполняется расчет интегрального показателя I_F (п. 5–7).

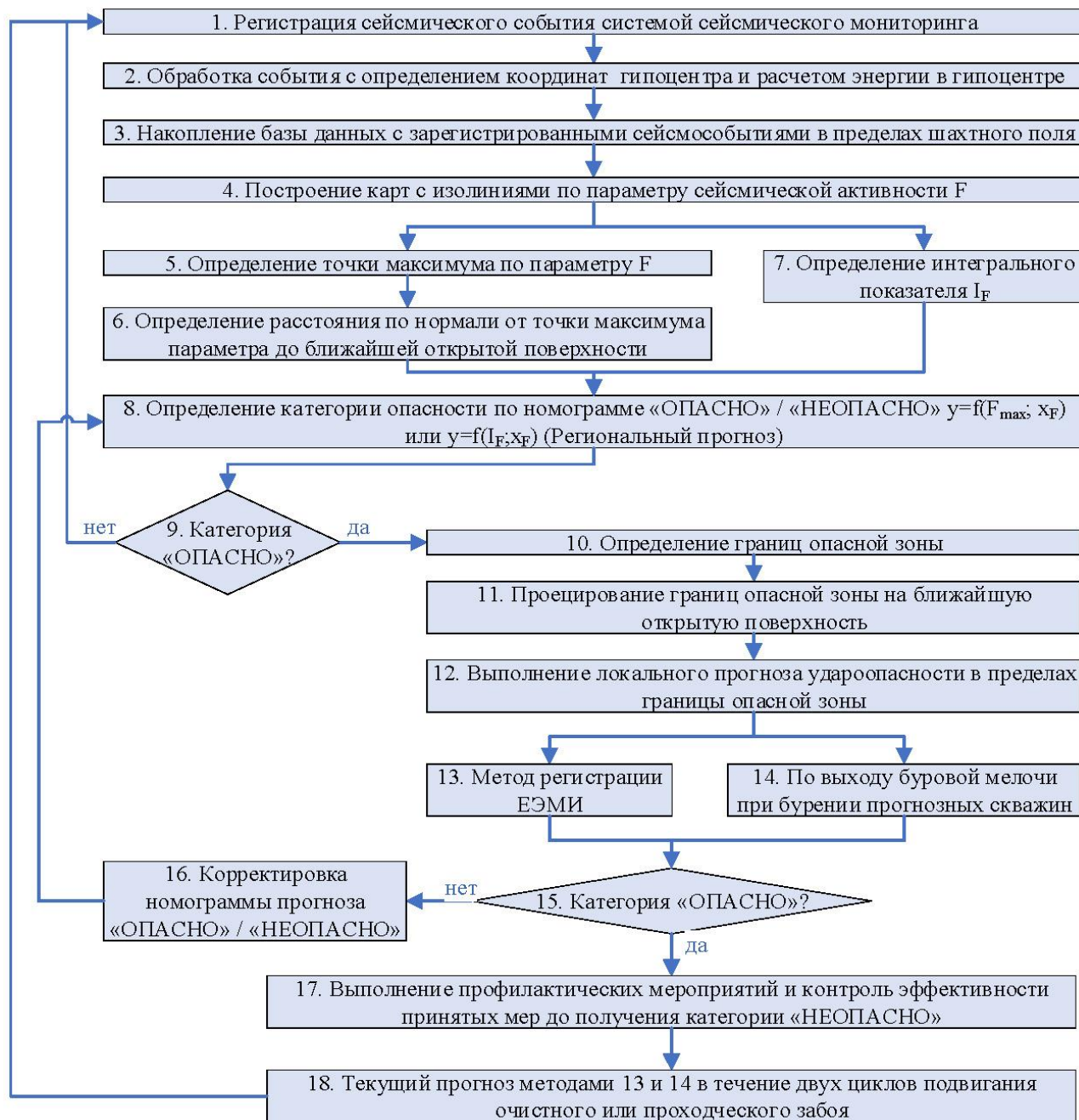


Рис. 3. Алгоритм комплексного прогноза удароопасности при ведении очистных работ
Fig. 3. Algorithm of complex prediction of impact hazard during cleaning operations

Затем по ранее установленным номограммам «ОПАСНО»/«НЕОПАСНО» $y=f(F_{\max}; x_F)$ (а) и $y=f(I_F; x_F)$ выполняется определение категории опасности (п. 8, 9). Если полученная точка на номограмме попадает в зону «НЕОПАСНО», продолжается ведение регистрации сейсмических событий в рамках регионального прогноза. Если по номограмме определена категория «ОПАСНО», то выполняется определение ширины зоны повышенного

сейсмознерговыведения в выработке, попадающей в данную зону (п. 10, 11). После установления ширины зоны повышенного сейсмознерговыведения в выработке на данном участке выполняется локальный прогноз по методу регистрации ЕЭМИ либо по выходу буровой мелочи для подтверждения или снятия ранее установленной категории опасности (п. 13–15). При неподтверждении категории «ОПАСНО» выполняется корректировка номо-

грамм «ОПАСНО»/«НЕОПАСНО» $y=f(F_{\max};x_F)$ и $y=f(I_F;x_F)$ (п. 16). В случае подтверждения категории «ОПАСНО» приступают к проведению профилактических мероприятий с контролем эффективности принятых мер с последующим выполнением текущего прогноз удароопасности методами локального прогноза не менее чем на двух циклах подвигания забоя подготовительной выработки или забоя очистной выработки после приведения его в неудороопасное состояние в соответствии с п. 97 Инструкции [1] (п. 17, 18).

Результаты

Для реализации алгоритма (рис. 3) были проведены специальные исследования, обеспечивающие переход от регионального прогноза к локальному и текущему. Экспериментальные исследования проводились в условиях шахты «Осинниковская» и включали решение следующих задач:

- обоснование метода определения границ зон повышенного сейсмозерговыделения для проведения локального и текущего прогноза;
- согласование и взаимоувязку прямых и геофизических методов прогноза.

Отработка выемочного столба 4-1-5-7 на ш. «Осинниковская» велась в сложных горногеологических условиях, а именно в контуре выемочного столба были спрогнозированы ряд тектонических нарушений. Также осложняющими факторами геомеханической обстановки являлся переезд очистным забоем передовой выработки – разрезной печи 4-1-5-7.

В ходе опытной эксплуатации системы GITS в пределах шахтного поля шахты «Осинниковская» были определены уровни опасности сейсмической активности по комплексному параметру F для расчётного блока $50 \times 50 \times 50$ м (табл. 3).

При формировании сейсмоактивной зоны вблизи очистного забоя или шпрека, попадающей в зону «ОПАСНО» по номограмме «ОПАСНО»/«НЕОПАСНО» $y=f(I_F;x_F)$ (рис. 2), следует спроецировать границы выявленной зоны на ближайшие выработки.

Параметры зоны повышенного сейсмозерговыделения при переезде очистным забоем группы тектонических нарушений и передовой выработки показаны на рис. 4.

При пересечении группы тектонических нарушений 22 октября 2020 г. (рис. 4, а) по данным регистрации сейсмических событий системой GITS была выявлена категория «ОПАСНО» по комплексному параметру сейсмической активности, максимальное значение комплексного параметра достигло $F=314$, расстояние от точки максимума до очистного забоя составило 26,5 м. Ширина зоны повышенного сейсмозерговыделения в очистном забое составила $\Delta x=37$ м.

При переезде передовой выработки фиксировались максимальные значения по параметру F за весь период отработки лавы, высокий уровень параметра F сохранялся начиная с 17 ноября по 16 декабря до момента окончания переезда передовой выработки. На рис. 4, б представлена карта с нанесением изолиний распределения значений параметра F на плане горных работ на 1 декабря 2020 г. Расстояние от максимума параметра $F=300,9$ до ближайшей открытой поверхности (забой лавы) составило 20,5 м. Протяженность зоны, соответствующей 4 уровню опасности по параметру F , в забое лавы 4-1-5-7 составила $\Delta x=63,7$ м.

Таблица 3. Классификация участков шахтного поля сейсмоактивности по параметру F

Table 3. Classification of sections of the mine field of seismic activity by parameter F

Уровень Level	Min значение параметра F Min value of the parameter F	Описание Description
0	0	Значение F – в диапазоне $0 < F < 10$ (фоновый уровень), или за 15 дней в блоке не произошло крупных сейсмических событий, «неопасно» F value is in the range of $0 < F < 10$ (background level) or there have been no major seismic events in the block for 15 days, "not dangerous"
1	10	Значение F – в диапазоне $10 \leq F < 50$, или внутри блока зарегистрировано событие с энергией от $1000 < E < 3000$ Дж, «неопасно» F value is in the range of $10 \leq F < 50$ or an event with an energy of $1000 < E < 3000$ J was registered inside the block, "not dangerous"
2	50	Значение F – в диапазоне $50 \leq F < 100$, или внутри блока зарегистрировано событие с энергией $3000 < E < 5000$ Дж, «умеренно напряженно, но не опасно» F value is in the range of $50 \leq F < 100$ or an event with an energy of $3000 < E < 5000$ J was registered inside the block, "moderately tensely, but not dangerous"
3	100	Значение F – в диапазоне $100 \leq F < 200$, или внутри блока зарегистрировано событие с энергией $5000 < E < 10000$ Дж, «напряженно, но не опасно» F value is in the range of $100 \leq F < 200$ or an event with an energy of $5000 < E < 10000$ J was registered inside the block, "tensely, but not dangerous"
4	200	Значение F – в диапазоне $200 \leq F < 300$, или зарегистрировано событие с энергией $10000 \leq E < 15000$ Дж, «напряжено, опасно» F value is in the range of $200 \leq F < 300$ or an event with an energy of $10000 \leq E < 15000$ J was registered, "tensely, dangerous"
5	300	Значение $F > 300$, или зарегистрировано событие с энергией $E > 15000$ Дж, «напряжено, опасно» $F > 300$ or an event with an energy of $E > 15000$ J was registered, "tensely, dangerous"



Рис. 4. Параметры зоны повышенного сейсмозергосвыделения в выработке при переезде забоем лавы: а) группы тектонических нарушений; б) передовой выработки; в) в вентиляционном штреке 4-1-5-7 (Палитра для окрашивания зон по параметру F соответствует табл. 3)

Fig. 4. Determination of the boundary of the danger zone on the nearest open surface when moving the lava face: а) groups of tectonic disturbances; б) advanced workings; в) in the ventilation drift 4-1-5-7 (The palette for coloring zones by parameter F corresponds to Table 3)

12 декабря 2020 г. появилась вторая зона повышенного сейсмозергосвыделения в межлавном целике в районе между действующим очистным забоем 4-1-5-7 и ранее отработанным выемочным столбом. Значение сейсмического параметра достигло $F=296$. Размеры зоны в очистном забое 8 м, в вентиляционном штреке $\Delta x=22$ м (рис. 4, в).

Динамика возникновения, развития и снижения зоны сейсмозергосвыделения для описанных выше участков показана на рис. 5, где приведены графики изменения во времени ширины зоны повышенного сейсмозергосвыделения Δx и комплексного параметра в форме произведения $F_{\max} \cdot \Delta x$. Из приведенных данных следует, что длительность геомеханических процессов, способствующих формированию удароопасного состояния массива, может изменяться в диапазоне 4–10 суток.

После установления границ зоны повышенного сейсмозергосвыделения на данном участке требу-

ется выполнить прогноз удароопасности по методу регистрации естественного электромагнитного излучения (ЕЭМИ) горных пород [22–31]. Основными преимуществами данного метода являются: мобильность, быстрота выполнения качественной оценки, низкая трудоемкость.

В ходе выполнения оценки удароопасности по методу регистрации ЕЭМИ массива горных пород устанавливается фактическая опасность данного участка. Если ЕЭМИ массива превышает установленные критерийные значения, определенные для данного пласта, то для подтверждения склонности массива к удароопасности следует выполнить прогноз удароопасности прямым методом – по выходу буровой мелочи.

Номограмма для прогноза удароопасности методом ЕЭМИ, обоснованная результатами реального прогноза на шахте «Осинниковская», приведена на рис. 6, а номограмма для прогноза по выходу буровой мелочи – на рис. 7.

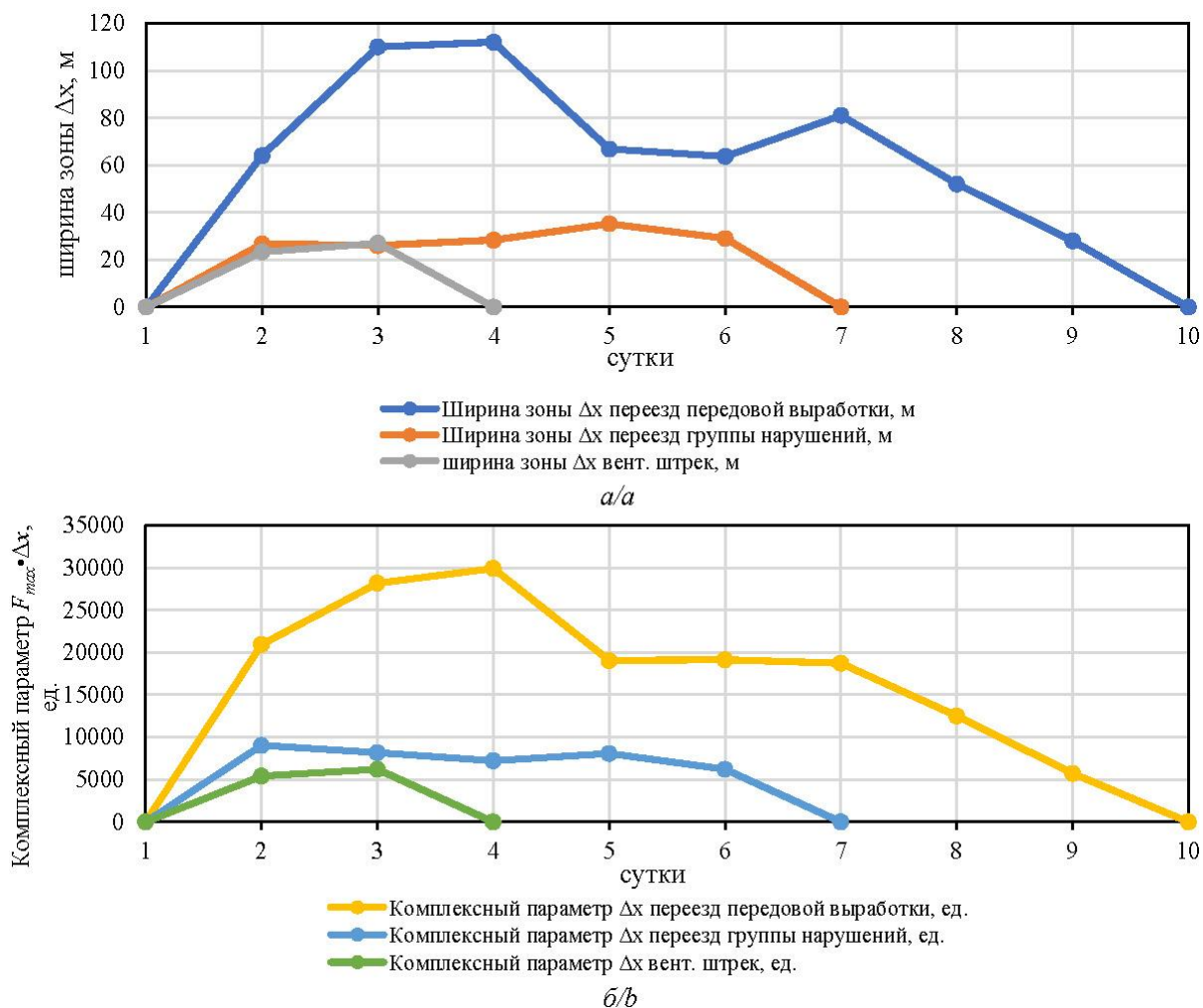


Рис. 5. Графики изменения: ширины зоны Δx (а), комплексного параметра $F_{max} \cdot \Delta x$ (б)
Fig. 5. Graphs of changes in: the width of the zone Δx (a), the complex parameter $F_{max} \cdot \Delta x$ (b)

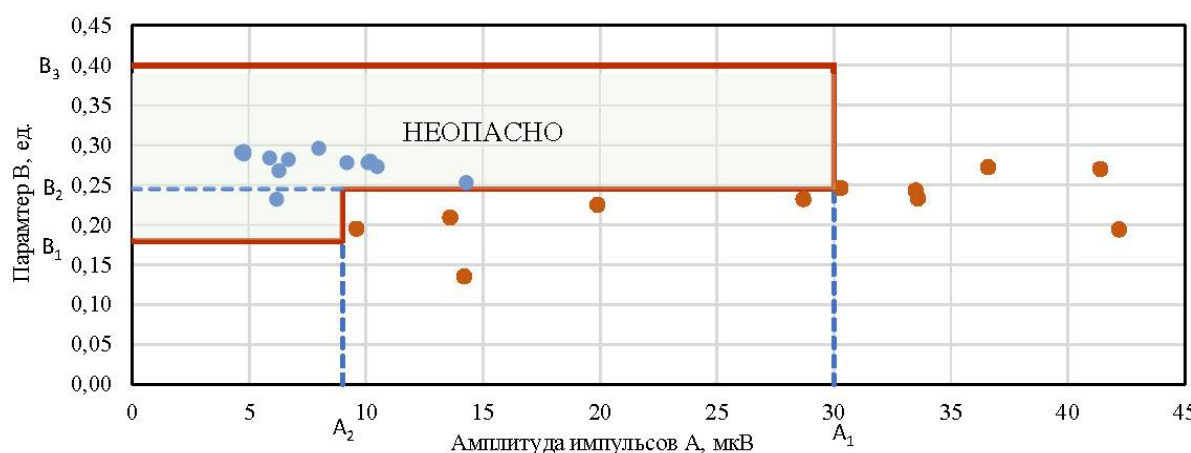


Рис. 6. Номограмма распределения параметров ЕЭМИ в забое конвейерного штрека 4-1-5-9 21.12.2021: ● – замеры ЕЭМИ, выполненные в забой и правый бок выработки; ● – замеры ЕЭМИ, выполненные в левый бок выработки; A_1 , A_2 , B_1 , B_2 и B_3 – прогностические параметры для категории «НЕОПАСНО» при проведении прогноза удароопасности комплексом ANGEL-M в проходческих забоях по пласту Е-5
Fig. 6. Nomogram of the distribution of the EEM parameters in the bottom of the conveyor drift 4-1-5-9 on 12.21.2021: ● – measurements of the EEM performed in the bottom and right side of the workings; ● – measurements of the EEM performed in the left side of the workings; A_1 , A_2 , B_1 , B_2 and B_3 – prognostic parameters for the category "NOT DANGEROUS" during the prediction of impact hazard by the complex ANGEL-M in tunneling faces along the E-5 formation

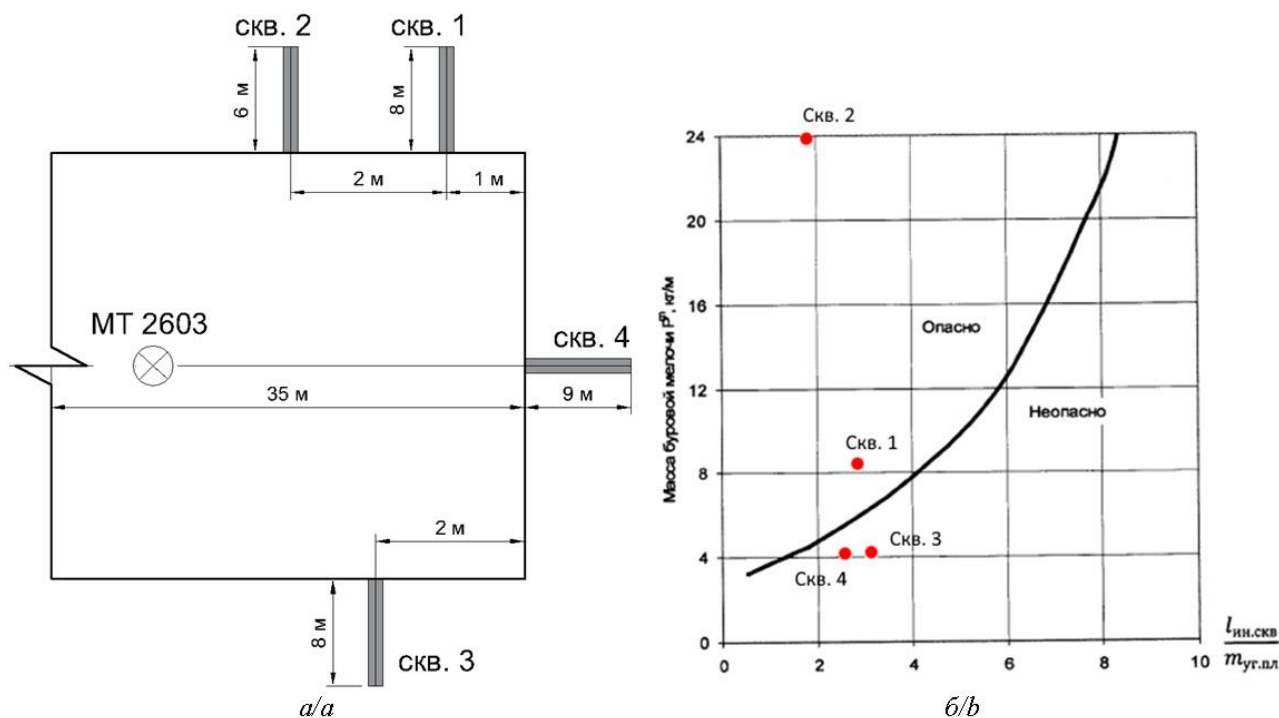


Рис. 7. Схема бурения скважин локального прогноза удароопасности (а) и номограмма установления категории «ОПАСНО» или «НЕОПАСНО» с результатами прогноза в конвейерном штреке 4-1-5-9 21.12.2021 (б)

Fig. 7. Scheme of drilling wells of the local forecast of impact hazard (a) and the nomogram of the establishment of the category "DANGEROUS" or "NOT DANGEROUS" with the results of the forecast in the conveyor drift 4-1-5-9 on 12.21.2021 (b)

В ходе выполнения локального прогноза удароопасности 2021.12.21 в забое конвейерного уклона 4-1-5-9 категория «ОПАСНО» была получена как по методу ЕЭМИ, так и по выходу бурового штыба. По методу ЕЭМИ превышение установленных критериальных значений было получено при направлении измерительной антенны геофизического комплекса ANGEL-M на левый борт выработки на удалении 1 м от забоя.

При выполнении прогноза удароопасности по выходу буровой мелочи в подготовительном забое по левому борту выработки в одном и четырех метрах от забоя в двух прогнозных шпурах была установлена категория «ОПАСНО». Схема бурения скважин локального прогноза удароопасности представлена на рис. 7, а. Максимальный выход буровой мелочи составил 30 литров с шестого метра прогнозного шпура (скв. 2) при нормируемом значении не более 5,7 литра. Забой был остановлен до приведения в безопасное состояние.

Предложенный метод комплексного подхода к региональному, локальному и текущему прогнозу удароопасности обеспечивает рациональное сочетание геофизических и прямых методов мониторинга и будет способствовать повышению точности прогноза и снижению затрат на его реализацию.

Выводы

1. Рациональное сочетание геофизических и прямых методов прогноза удароопасности участков угольных пластов обеспечивается алгоритмом, включающим региональный прогноз по комплексному параметру сейсмической активности F с построением карт изолиний, определением категории опасности по максимальным значениям F (интегрального показателя F) и расстоянию по нормали от точки максимума до ближайшей открытой поверхности, установлением границ опасного участка по пересечению соответствующей изолинии с поверхностью обнажения, проведение в соответствии с нормативными документами геофизического и прямого локального (текущего) прогноза в пределах установленных границ.
2. В качестве методов локального (текущего) прогноза в условиях угольных шахт Кузбасса целесообразно использовать геофизические методы регистрации сейсмической активности и естественного электромагнитного излучения, а также прямой метод по выход бурового штыба. При этом следует применять диапазоны критериальных значений, полученные в ходе экспериментальных исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Инструкция по прогнозу динамических явлений и мониторингу массива горных пород при отработке угольных месторождений» // Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору приказ от 10 декабря 2020 года № 515.
2. Основные принципы построения систем сейсмического мониторинга при отработке удароопасных угольных пластов / Е.Е. Разумов, Г.Д. Рукавишников, С.Н. Мулёв, С.М. Простов // Горный журнал. – 2021. – № 1. – С. 8–12.
3. Алгоритмы обработки сейсмической информации / Е.Е. Разумов, С.М. Простов, Г.Д. Рукавишников, С.Н. Мулёв // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2022. – № 2. – С. 17–29.
4. Егоров А.П., Рыжов В.А. К вопросу систематизации геофизических исследований геомеханического состояния массива горных пород и земной поверхности для оперативного контроля безопасности ведения горных работ на угольных шахтах // Уголь. – № 10. – 2019. – С. 22–28.
5. Klishin V.I., Shadrin A., Teleguz A. Controlling coal rock massif hydro-treating process by instrumental and geophysical methods // E3S Web of Conferences: Vith International Innovative Mining Symposium. – Kemerovo, 19–21 October 2021. – Kemerovo: EDP Sciences, 2021. – Vol. 315. – P. 03029. DOI: 10.1051/e3sconf/202131503029.
6. Justification of safe underground development of mountain deposits of complex structure by geophysical methods / V. Lyashenko, O. Khomenko, T. Chekushina, F. Topolnij // Technology audit and production reserves. – 2020. – Vol. 5. – № 3 (55). – P. 9–18. DOI: 10.15587/2706-5448.2020.215737.
7. Pudov E., Kuzin E., Efremkov A. Estimation of impact of rock conditions on the conveyor workings geometry by means of geophysical methods // IOP conference series: materials science and engineering: the conference proceedings ISPCIT'2020. – Veliky Novgorod, 25–26 June 2020. – Veliky Novgorod: IOP Publishing Ltd, 2020. – Vol. 939. – P. 012063. DOI: 10.1088/1757-899X/939/1/012063.
8. Improvement of methods for sparse model identification of pulsed geophysical signals / A. Tristanov, O. Lukovenkova, Y. Marapulets, A. Kim // Signal Processing – Algorithms, Architectures, Arrangements, and Applications Conference Proceedings, SPA. – Poznan, 18–20 September 2019. – Poznan: IEEE Computer Society, 2019. – P. 256–260. DOI: 10.23919/SPA.2019.8936817.
9. Overview of processing and analysis methods for pulse geophysical signals / O.O. Lukovenkova, Yu.I. Senkevich, A.A. Solodchuk, A.O. Shcherbina // E3S Web of Conferences. – Paratunka, 22–25 September 2020. – Paratunka: EDP Sciences, 2020. – Vol. 196. – P. 02023. DOI: 10.1051/e3sconf/202019602023.
10. Копылов К.Н., Смирнов О.В., Кулик А.И. Акустический контроль состояния массива и прогноз динамических явлений // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2015. – № 7. – С. 82–88.
11. Испытания автоматизированной системы акустического контроля состояния массива горных пород / К.Н. Копылов, О.В. Смирнов, А.И. Кулик, П.В. Потапов // Уголь. – 2015. – № 7. – С. 44–47.
12. Смирнов О.В., Кулик А.И., Лапин Е.А. Прогноз геологических нарушений по параметрам акустического сигнала // Уголь. – 2015. – № 11. – С. 76–79.
13. Соколов К.О. Частотно-временное представление георадиолокационных разрезов на основе непрерывного вейвлет-преобразования // ФТПРПИ. – 2014. – № 1. – С. 77–81.
14. Прудский Н.Д., Соколов К.О., Федорова Л.Л. Физическое моделирование распространения электромагнитной высокочастотной волны в массиве горных пород с трещиной, заполненной льдом // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2018. – № 11. – С. 107–113.
15. Анализ обследований состояния горных выработок, закрепленных анкерной крепью с применением георадара / В.А. Бакин, Е.Ю. Пудов, Е.Г. Кузин, К.К. Ремпель // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2015. – № 10. – С. 172–177.
16. Kavin O.N. Assessment of the prospective water inflow hazards using georadar: case study of upper Kama potash deposit // Mine Water: Technological and Environmental Challenges. Proceedings of International Mine Water Association Conference. – Perm: Perm State University, Perm Federal Research Center of the Ural Branch of RAS, 2019. – P. 23–27.
17. Применение современных технических средств мониторинга для оценки соответствия проектных параметров анкерной крепи изменяющимся условиям проведения подземных выработок / А.В. Рогачков, А.С. Позолотин, В.Ф. Исамбетов, П.И. Муравский, П.В. Гречишкин // Уголь. – 2012. – № 12. – С. 38–40.
18. Особенности технического аудита подготовительных выработок угольных шахт, закрепленных анкерной крепью / П.В. Гречишкин, А.В. Хаймин, А.С. Позолотин, А.В. Рогачков, Е.А. Разумов // Уголь. – 2013. – № 8. – С. 89–90.
19. Буянова Д.С. Особенности электрометрического контроля трещиноватости массива горных пород вокруг подземных выработок // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2014. – № 6. – С. 227–232.
20. Повышение эффективности оценки состояния пород кровли выработок с применением различных методов в условиях шахты «Чертинская-Коксовая» / П.В. Гречишкин, В.Ф. Харченко, Е.Ю. Розанов, В.С. Горностаев, С.Ф. Панин // Уголь. – 2019. – № 10. – С. 42–45.
21. Разумов Е. Е., Простов С. М., Петрова О. А. Экспериментально-аналитическое исследование динамики геомеханических процессов при отработке угольного пласта в районе тектонического нарушения // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2024. – № 3. – С. 102–118. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_3_0_102
22. Расчётная и аппаратная база геомониторинга состояния массива методом регистрации естественного электромагнитного излучения / С.М. Простов, Е.Е. Разумов, С.Н. Мулёв, Е.А. Шабанов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333. – № 11. – С. 183–193.
23. Study on the characteristics of coal rock electromagnetic radiation (EMR) and the main influencing factors / X. Song, X. Li, Z. Li, Z. Zhang, F. Cheng, P. Chen, Y. Liu // Journal of Applied Geophysics. – 2018. – Vol. 148. – P. 216–225.
24. Rabinovitch A., Frid V., Bahat D. Surface oscillations – a possible source of fracture induced electromagnetic radiation // Tectonophysics. – 2007. – Vol. 431. – P. 15–21.

25. Characteristics and precursor information of electromagnetic signals of mining-induced coal and gas outburst / L. Qiu, Z. Li, E. Wang, Z. Liu, J. Ou, X. Li, M. Ali, Y. Zhang, S. Xia // *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. – 2018. – Vol. 54. – P. 206–215.
26. Measurement of the stress field of a tunnel through its rock EMR / L. Qiu, E. Wang, D. Song, Z. Liu, R. Shen, G. Lv, Z. Xu // *Journal Geophys. Eng.* – 2017. – Vol. 14. – P. 949–959.
27. Changes in frequency of electromagnetic radiation from loaded coal rock / D. Song, E. Wang, X. Song, P. Jin, L. Qiu // *Rock Mech Rock Eng.* – 2016. – Vol. 49. – P. 291–302.
28. Use of electromagnetic radiation from fractures for mining-induced stress field assessment / D. Song, E. Wang, X. He, H. Jia, L. Qiu, P. Chen, S. Wang // *Journal Geophys. Eng.* – 2018. – Vol. 15. – P. 1093–1103.
29. Liu X., Wang E. Study on characteristics of EMR signals induced from fracture of rock samples and their application in rockburst prediction in copper mine // *Journal Geophys. Eng.* – 2018. – Vol. 15. – P. 909–920.
30. Shaporeva G., Bizyaev A., Jakovitskaya O. Analysis of electromagnetic emission signals accompanying the process of rock destruction // *Progress through Innovations Proceedings 2018 VIII International Academic and Research Conference of Graduate and Post graduate Students*. – Novosibirsk, 2018. – P. 159–160.
31. Обоснование критериев локального прогноза удароопасности методом регистрации естественного электромагнитного излучения на шахтах Кузбасса / С.М. Простов, Е.Е. Разумов, С.Н. Мулёв, Е.А. Шабанов // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2022. – Т. 333. – № 12. – С. 99–110.

Информация об авторах

Егор Евгеньевич Разумов, ассистент, научный сотрудник лаборатории геофизических исследований Акционерного Общества «Научно-исследовательский институт горной геомеханики маркшейдерского дела – межотраслевой научный центр ВНИМИ», Россия, 650002, г. Санкт-Петербург, ул. Сосновый бор, 1. razumov@vnimi.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3696-8553>

Сергей Михайлович Простов, доктор технических наук, профессор кафедры строительного производства и экспертизы недвижимости, Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева, Россия, 650002, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28. psm.kem@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0780-2690>

Евгений Анатольевич Шабанов, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой строительного производства и экспертизы, Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева, Россия, 650002, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28. evgenshab@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2460-6467>

Поступила в редакцию: 03.10.2023

Поступила после рецензирования: 10.01.2024

Принята к публикации: 14.06.2024

REFERENCES

1. *Federal norms and rules in the field of industrial safety. Instructions for the prediction of dynamic phenomena and monitoring of rock mass during mining of coal deposits*. Federal service for environmental, technological and nuclear supervision order no. 515, December 10, 2020. (In Russ.)
2. Razumov E.E., Rukavishnikov G.D., Mulev S.N., Prostov S.M. The basic principles of building seismic monitoring systems when working off impact-prone coal seams. *Mining journal*, 2021, no. 1, pp. 8–12. (In Russ.)
3. Razumov E.E., Prostov S.M., Rukavishnikov G.D., Mulev S.N. Algorithms for processing seismic information. *Mining Information and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*, 2022, no. 2, pp. 17–29. (In Russ.)
4. Egorov A.P., Ryzhov V.A. On the issue of systematization of geophysical studies of the geomechanical state of the rock mass and the Earth's surface for operational safety control of mining operations at coal mines. *Coal*, 2019, no. 10, pp. 22–28. (In Russ.)
5. Klishin V.I., Shadrin A., Teleguz A. Controlling coal rock massif hydro-treating process by instrumental and geophysical methods. *E3S Web of Conferences, VIth International Innovative Mining Symposium*. Kemerovo, October 19–21, 2021. Kemerovo, EDP Sciences, 2021. Vol. 315, p. 03029. DOI: 10.1051, e3sconf, 202131503029.
6. Lyashenko V., Khomenko O., Chekushina T., Topolnij F. Justification of safe underground development of mountain deposits of complex structure by geophysical methods. *Technology audit and production reserves*, 2020, vol. 5, no. 3 (55), pp. 9–18. DOI: 10.15587, 2706-5448.2020.215737.
7. Pudov E., Kuzin E., Efremkov A. Estimation of impact of rock conditions on the conveyor workings geometry by means of geophysical methods. *IOP conference series, materials science and engineering, the conference proceedings ISPCIET'2020*. Veliky Novgorod, June 25–26, 2020. Veliky Novgorod, IOP Publishing Ltd, 2020. Vol. 939, p. 012063. DOI: 10.1088, 1757-899X, 939, 1, 012063.
8. Tristanov A., Lukovenkova O., Marapulets Y., Kim A. Improvement of methods for sparse model identification of pulsed geophysical signals. *Signal Processing, Algorithms, Architectures, Arrangements, and Applications Conference Proceedings, SPA, Poznan*, September 18–20, 2019. Poznan, IEEE Computer Society, 2019. p. 256–260. DOI: 10.23919, SPA.2019.8936817.
9. Lukovenkova O.O., Senkevich Yu.I., Solodchuk A.A., Shcherbina A.O. Overview of processing and analysis methods for pulse geophysical signals. *E3S Web of Conferences*. Paratunka, September 22–25, 2020. Paratunka, EDP Sciences, 2020. Vol. 196, p. 02023. DOI: 10.1051, e3sconf, 202019602023.
10. Kopylov K.N., Smirnov O.V., Kulik A.I. Acoustic control of the array state and forecast of dynamic phenomena. *Mining information and analytical bulletin*, 2015, no. 7, pp. 82–88. (In Russ.)

11. Kopylov K.N., Smirnov O.V., Kulik A.I., Potapov P.V. Tests of an automated acoustic control system for the state of an array of rocks. *Coal*, 2015, no. 7, pp. 44–47. (In Russ.)
12. Smirnov O.V., Kulik A.I., Lapin E.A. Forecast of geological disturbances by acoustic signal parameters. *Coal*, 2015, no. 11, pp. 76–79. (In Russ.)
13. Sokolov K.O. Frequency-time representation of geo-radar sections based on continuous wavelet transform. *FTPRPI*, 2014, no. 1, pp. 77–81. (In Russ.)
14. Prudetsky N.D., Sokolov K.O., Fedorova L.L. Physical modeling of electromagnetic high-frequency wave propagation in an array of rocks with a crack filled with ice. *Mining information and analytical bulletin*, 2018, no. 11, pp. 107–113. (In Russ.)
15. Bakin V.A., Pudov E.Yu., Kuzin E.G., Rempel K.K. Analysis of surveys of the state of mine workings secured with anchorage using georadar. *Mining information and analytical bulletin*, 2015, no. 10, pp. 172–177. (In Russ.)
16. Kovin O.N. Assessment of the prospective water inflow hazards using georadar, case study of upper Kama potash deposit. *Mine Water, Technological and Environmental Challenges. Proceedings of International Mine Water Association Conference*. Perm, Perm State University, Perm Federal Research Center of the Ural Branch of RAS, 2019. pp. 23–27.
17. Rogachkov A.V., Pozolotin A.S., Isambetov V.F., Muravsky P.I., Grechishkin P.V. Application of modern technical monitoring tools to assess compliance of design parameters of anchor support with changing conditions of underground workings. *Coal*, 2012, no. 12, pp. 38–40. (In Russ.)
18. Grechishkin P.V., Khaimin A.V., Pozolotin A.S., Rogachkov A.V., Razumov E.A. Features of technical audit of preparatory workings of coal mines fixed with anchorage. *Coal*, 2013, no. 8, pp. 89–90. (In Russ.)
19. Buyanova D.S. Features of electrometric control of fracturing of rock mass around underground workings. *Mining information and analytical bulletin*, 2014, no. 6, pp. 227–232. (In Russ.)
20. Grechishkin P.V., Kharchenko V.F., Rozanov E.Yu., Gornostaev V.S., Panin S.F. Improving the efficiency of assessing the condition of the roof rocks of workings using various methods in the conditions of the Chertinskaya-Koksovaya mine. *Coal*, 2019, no. 10, pp. 42–45. (In Russ.)
21. Razumov E.E., Prostov S.M., Petrova O.A. Experimental and analytical study of the dynamics of geomechanical processes during mining of a coal seam in the area of tectonic disturbance. *Mining information and analytical Bulletin*, 2024, no. 3, pp. 102–118. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_3_0_102
22. Prostov S.M., Razumov E.E., Mulev S.N., Shabanov E.A. Calculation and hardware base of geomonitoring the state of the array by the method of registration of natural electromagnetic radiation. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, no. 11, pp. 183–193. (In Russ.)
23. Song X., Li X., Li Z., Zhang Z., Cheng F., Chen P., Liu Y. Study on the characteristics of coal rock electromagnetic radiation (EMR) and the main influencing factors. *Journal of Applied Geophysics*, 2018, vol. 148, pp. 216–225.
24. Rabinovitch A., Frid V., Bahat D. Surface oscillations a possible source of fracture induced electromagnetic radiation. *Tectonophysics*, 2007, vol. 431, pp. 15–21.
25. Qiu L., Li Z., Wang E., Liu Z., Ou J., Li X., Ali M., Zhang Y., Xia S. Characteristics and precursor information of electromagnetic signals of mining-induced coal and gas outburst. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2018, vol. 54, pp. 206–215.
26. Qiu L., Wang E., Song D., Liu Z., Shen R., Lv G., Xu Z. Measurement of the stress field of a tunnel through its rock EMR. *Journal Geophys. Eng.*, 2017, vol. 14, pp. 949–959.
27. Song D., Wang E., Song X., Jin P., Qiu L. Changes in frequency of electromagnetic radiation from loaded coal rock. *Rock Mech Rock Eng.*, 2016, vol. 49, pp. 291–302.
28. Song D., Wang E., He X., Jia H., Qiu L., Chen P., Wang S. Use of electromagnetic radiation from fractures for mining induced stress field assessment. *Journal Geophys. Eng.*, 2018, vol. 15, pp. 1093–1103.
29. Liu X., Wang E. Study on characteristics of EMR signals induced from fracture of rock samples and their application in rockburst prediction in copper mine. *Journal Geophys. Eng.*, 2018, vol. 15, pp. 909–920.
30. Shaporeva G., Bizyaev A., Jakovitskaya O. Analysis of electromagnetic emission signals accompanying the process of rock destruction. *Progress through Innovations Proceedings 2018 VIIth International Academic and Research Conference of Graduate and Post graduate Students*. Novosibirsk, 2018. pp. 159–160.
31. Prostov S.M., Razumov E.E., Mulev S.N., Shabanov E.A. Substantiation of criteria for local prediction of impact hazard by the method of registration of natural electromagnetic radiation in the mines of Kuzbass. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, no. 12, pp. 99–110. (In Russ.)

Information about the authors

Egor E. Razumov, Assistant, Researcher, Scientific Research Institute of Mining Geomechanics of Surveying – Intersectoral Research Center VNIMI, 1, Sosnovy Bor street, St. Petersburg, 650002, Russian Federation. razumov@vnimi.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3696-8553>

Sergey M. Prostov, Dr. Sc., Professor, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 28, Vesennyyaya street, Kemerovo, 650002, Russian Federation. psm.kem@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0780-2690>

Evgeny A. Shabanov, Cand. Sc., Associate Professor, Head of the Construction Production and Expertise Department, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University», 28, Vesennyyaya street, Kemerovo, 650002, Russian Federation. evgenshab@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2460-6467>

Поступила в редакцию: 03.10.2023

Поступила после рецензирования: 10.01.2024

Принята к публикации: 14.06.2024

УДК 504.062.2

DOI: 10.18799/24131830/2024/8/4494

Шифр специальности ВАК: 1.5.15; 1.6.21; 2.10.2

Аспекты термической утилизации органических отходов птицеводства

Д.А. Козырь 

Севастопольский государственный университет, Россия, г. Севастополь

 kozyr.dmitriy@gmail.com

Аннотация. Актуальность. В настоящее время птицеводство, как часть агропромышленного комплекса, демонстрирует уверенный рост, что приводит к увеличению образования органических отходов. Куриный помет является проблемным органическим отходом птицеводства с точки зрения его количества, экологической опасности и содержания влаги. С другой стороны, куриный помет является потенциальным возобновляемым источником фосфора. Использование куриного помета в качестве техногенного месторождения фосфора позволит повысить уровень экологической и продовольственной безопасности. **Цель.** Исследование влияния параметров плазменной и пиролизной обработки куриного помета на потерю массы отхода и содержание фосфора в биоугле. **Методы.** Экспериментальные исследования обработки куриного помета сверхвысокочастотной плазмой и индукционным пиролизом; определение массовой доли влаги при высушивании и потере массы отхода при утилизации гравиметрическим методом; определение фосфора в биоугле колориметрическим методом Дениже в модификации А. Малюгина и С. Хреновой. **Результаты и выводы.** Проведены экспериментальные исследования по обработке подстилочного куриного помета сверхвысокочастотной плазмой и индукционным пиролизом. Показано, что эффективными способами уменьшения массы куриного помета и предотвращения загрязнения окружающей среды являются обработка помета сверхвысокочастотной плазмой и его индукционный пиролиз. Установлено, что при обработке куриного помета в сверхвысокочастотной плазме в инертной среде при температуре до 1560 °С масса отходов уменьшается на 92,76 % при длительности воздействия 7 минут. При этом содержание P_2O_5 в биоугле составляет до 52,2 г/100 г биоугля. Дальнейшее воздействие плазмой приводит к остекловыванию отходов. При повышении времени обработки куриного помета сверхвысокочастотной плазмой экспоненциально увеличивается потеря массы отхода. Индукционный пиролиз куриного помета в инертной среде при температуре 1000 °С позволяет уменьшить массу отхода на 92,30 %. Содержание P_2O_5 в биоугле увеличивается с повышением температуры пиролиза и составляет до 12,64 г/100 г биоугля. Биоуголь, полученный в результате обработки куриного помета сверхвысокочастотной плазмой и индукционным пиролизом, может рассматриваться как источник фосфора. Полученные результаты свидетельствуют о возможности утилизации куриного помета сверхвысокочастотной плазмой и индукционным пиролизом.

Ключевые слова: органические отходы, фосфор, сверхвысокочастотная плазма, пиролиз, утилизация отходов, биоуголь

Для цитирования: Козырь Д.А. Аспекты термической утилизации органических отходов птицеводства // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 8. – С. 187–196. DOI: 10.18799/24131830/2024/8/4494

UDC 504.062.2

DOI: 10.18799/24131830/2024/8/4494

Aspects of thermal utilization of organic poultry waste

D.A. Kozyr✉

Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation

✉kozyr.dmitriy@gmail.com

Abstract. Relevance. Currently, poultry farming, as part of the agro-industrial complex, is showing strong growth, which leads to an increase in the generation of organic waste. Chicken manure is a problematic organic waste from poultry farming in terms of its quantity, environmental hazard and moisture content. On the other hand, chicken manure is a potential renewable source of phosphorus. The use of chicken manure as a technogenic deposit of phosphorus will improve the level of environmental and food security. **Aim.** Research of influence of parameters of plasma and pyrolysis treatment of chicken manure on waste weight loss and phosphorus content in biochar. **Methods.** Experimental studies of the treatment of chicken manure with microwave plasma and induction pyrolysis; determination of the mass fraction of moisture during drying and loss of waste mass during disposal by the gravimetric method; determination of phosphorus in biochar using the Denizhe colorimetric method modified by A. Malyugin and S. Khrenova. **Results and conclusions.** The author has carried out the experimental studies on the treatment of chicken manure with microwave plasma and induction pyrolysis. It was shown that effective ways to reduce the mass of chicken manure and prevent environmental pollution are the treatment of manure with microwave plasma and its induction pyrolysis. It was established that when chicken manure is processed in microwave plasma in an inert environment at temperatures up to 1560°C, the mass of waste is reduced by 92.76% with an exposure duration of 7 minutes. At the same time, the content of P₂O₅ in biochar is up to 52.2 g/100 g of biochar. Further exposure to plasma leads to vitrification of the waste. As the time of treatment of chicken manure with microwave plasma increases, the loss of waste mass grows exponentially. Induction pyrolysis of chicken manure in an inert environment at a temperature of 1000°C makes it possible to reduce the mass of waste by 92.30%. P₂O₅ content in biochar grows with increasing pyrolysis temperature and amounts to 12.64 g/100 g of biochar. Biochar obtained by treating chicken manure with microwave plasma and induction pyrolysis can be considered as a source of phosphorus. The results obtained indicate the possibility of utilizing chicken manure using microwave plasma and induction pyrolysis.

Keywords: organic waste, phosphorus, microwave plasma, pyrolysis, waste disposal, biochar

For citation: Kozyr D.A. Aspects of thermal utilization of organic poultry waste. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 8, pp. 187–196. DOI: 10.18799/24131830/2024/8/4494

Введение

Важную роль в загрязнении окружающей среды играет сельское хозяйство. Особый вклад в это загрязнение вносит птицеводство. Современное птицеводство характеризуется высоким поголовьем и образованием значительных объемов промышленных отходов [1, 2]. В Российской Федерации за 2022 г. образовалось 3769161 т помета куриного свежего (3 класс опасности) и 778661 т помета куриного перепревшего (4 класс опасности) [3]. Увеличение мирового производства птицы приводит к ежегодному увеличению объема отходов до 68 млрд т, включая сточные воды [4].

Куриный помет является проблематичным отходом, учитывая его количество, а также высокое содержание влаги, которое затрудняет транспортировку и решение проблем обращения с ним. При длительном хранении помёта на грунтовых площадках происходит загрязнение почвы, грунтовых

и поверхностных вод. В атмосферный воздух при хранении помета выбрасываются аммиак, сероводород, фенол, метан, диоксид углерода. Только при обезвоживании помета до влажности 15 % в нем прекращаются все нежелательные биологические процессы и возможно его хранение без ущерба для окружающей среды [5].

С другой стороны, куриный помет является ценным органическим удобрением. В химическом составе помета содержится азот, калий, фосфор и магний. Концентрация этих полезных веществ значительно выше, чем в других натуральных удобрениях животного происхождения. Благодаря высокому содержанию таких компонентов, помет можно использовать в качестве удобрения для улучшения почвы и повышения ее плодородия [6]. Куриный помет является потенциальным возобновляемым источником фосфора. Содержание фосфора в помете не подвержено сезонным изменениям, в отличие от калия и кальция [7].

Фосфор является ключевым компонентом удобрений и важным биологическим элементом для развития растений. Почти 90 % фосфора добывается из невозобновляемых природных ресурсов, встречающихся в форме фосфоритной руды. По содержанию оксида фосфора (P_2O_5) фосфоритные руды подразделяются на три категории: низкосортные фосфаты (12–16 %), умеренно-низкокачественные фосфаты (17–25 %) и высокосортные фосфаты. Месторождения с содержанием P_2O_5 выше 28 % считаются экономически выгодными. В связи с высоким спросом на производство минеральных удобрений потребление природных месторождений фосфатов постоянно увеличивается. Прогнозируется, что запасы природного фосфора могут быть истощены в течение следующих 60–90 лет. При этом восстановление природных месторождений фосфатов занимает от 10 до 15 миллионов лет [8].

Основными способами утилизации помета являются прямое внесение в почву, биологические и физические способы.

Прямое внесение куриного помета в почву является простым способом обращения с отходами, но имеет ряд недостатков – перевозка значительного количества стоков экономически нецелесообразна, почва и водные объекты могут заражаться инфекционными и токсическими элементами.

Биологические способы утилизации обладают невысокими капитальными и энергетическими затратами, но отличаются большой длительностью, требуют дополнительных хранилищ и поддержания климатических параметров, имеют повышенный риск утечек загрязненных стоков в дождливый период и во время весенних паводков.

Физические способы характеризуются быстротой, полной стерилизацией органических отходов и уменьшением объемов отхода, но требуют высоких энергетических затрат и квалификации персонала для работы с оборудованием [9, 10]. Наиболее распространенным способом переработки куриного помета на птицефабриках России является такой физический способ, как гранулирование [11].

Газификация и пиролиз куриного помета – одни из перспективных способов физической утилизации биомассы, основными продуктами которых являются биоуголь и синтез-газ. Определяющее значение для эффективности технологических процессов имеют непосредственно условия и режимы процессов газификации. Биоуголь, синтезированный из отходов, является экологически чистым и дешевым материалом для устранения загрязнений [12].

Для практического использования оптимальный режим пиролиза следует подбирать индивидуально для каждой пробы помета. Для получения биоугля, с последующим его применением в качестве удоб-

рений, рекомендуется использовать пиролиз куриного помета при температуре 500 °C и выдержке в течение 1 часа [13]. Использование азотной атмосферы при пиролизе позволяет получить больший выход ценных компонентов. Для энергосберегающих и экономических целей, более подходящим является использование воздушной атмосферы пиролиза [14].

Химический состав золы куриного помета существенно различается и зависит от применяемого способа сжигания. Анализ процесса сжигания куриного помета в муфельной печи показал, что ключевым параметром, влияющим на качество получаемой золы, является используемая температура. Содержание P_2O_5 в золе составляло: до 31,77 мас. % при 900 °C; до 26,71 мас. % при 700 °C и до 25,00 мас. % при 500 °C соответственно. Увеличение температуры сжигания приводит к уменьшению содержания P_2O_5 в аморфной фазе (6,57 мас. % при 900 °C) [15].

Исследования показали, что аморфная фаза является источником биодоступной формы фосфора, содержащейся в золе помета птиц. Эксперименты по сжиганию образцов птичьего помета в течение 2 часов при 500, 750 и 1000 °C показали, что доля аморфной фазы в золе является значительной и зависит от температуры сгорания образца [16].

Одним из методов обработки органических отходов является гидротермальная карбонизация. В соответствии с принципами экономики замкнутого цикла, посредством гидротермальной карбонизации органических отходов, можно получить полезные компоненты и энергоносители [17]. Исследователями установлено, что при пиролизе концентрация фосфора повышается в 1,2–1,9 раза, а гидротермальная карбонизация сохраняет большую часть фосфора (90–99 %) в гидроугле. С помощью процесса кислотного выщелачивания до 57,3 % общего фосфора, присутствующего в полукоксах и золе, было извлечено в виде аморфного фосфата кальция [18]. Последовательная кислотная и щелочная экстракция позволяет восстановить до 91 % фосфора с низким уровнем загрязнения металлами [19].

Технология плазменной обработки отходов является одним из перспективных методов сокращения отходов. Высокие температуры позволяют перерабатывать любые виды отходов (твердые, жидкие, газообразные), где происходит высокоэнергетическое разложение веществ. Кроме этого, воздействие температур, возникающих при плазменном горении, снижает объем перерабатываемых отходов [20]. Использование высокотемпературного плазменного потока, низкое содержание кислорода в воздухе и скорость процесса позволяют нейтрализовать токсичные вещества, содержащиеся в отходах.

Использование куриного помета в качестве сырья для производства минеральных удобрений является альтернативой уже истощенным фосфоритным породам. Решением для преобразования органических отходов птицеводства в источник фосфора является его предварительное сжигание с последующей экстракцией фосфора из золы и биоугля, в доступной для растений форме. Сжигание птичьего помета дает дополнительные преимущества, такие как уменьшение массы отходов с одновременным снижением биологической угрозы и неприятного запаха.

Освоение техногенных месторождений позволит комплексно использовать природные ресурсы, получать новые виды продукции и реализовывать цели устойчивого развития [21, 22].

Объекты и методика исследования

Общая идея исследования заключается в изучении влияния параметров плазменной и пиролизной обработки органических отходов птицеводства на потерю массы отхода и содержание фосфора в биоугле.

Для исследования параметров термической утилизации куриного помета использовался высушенный подстилочный куриный помет домашнего хозяйства, расположенного в г. Севастополь. Массовая доля влаги определялась в соответствии с ГОСТ 26713-85. Удобрения органические. Метод определения влаги и сухого остатка [23]. При высушивании куриный помет был выдержан при 105–110 °С до достижения постоянной массы. Массовая доля влаги исследуемого подстилочного помета составила 56,7 %.

Плазменная обработка подстилочного помета проводилась в экспериментальной установке сверхвысокочастотной (СВЧ) плазмы в инертной среде. Мощность экспериментальной установки СВЧ-плазмы составляет 4,2 кВт.

Навеску массой 2 г размещали в камере из шамотно-глиняных тиглей. Максимальная рабочая температура в экспериментальной установке составляла $T=1560$ °С. Камеру с образцом помещали в резонаторную камеру и накрывали колпаком, предварительно установив подложку с источником первоначальной эмиссии. При возникновении устойчивого плазменного СВЧ-разряда засекалось время на секундомере. Для удержания СВЧ-плазмы над исследуемым образцом и для визуальной фиксации плазменного СВЧ-разряда использовался кварцевый колпак с газоотводом. В газоотвод кварцевого колпака помещали предохранительный клапан, который предназначен для предотвращения выхода плазмы в объём СВЧ-камеры. Минимальное время обработки помета в СВЧ плазме составляло 3 мин, а максимальное – 7 мин. Измерения проводились с шагом в одну минуту. При увеличе-

нии времени обработки до 7 мин наблюдалось остекловывание навески, дальнейшее увеличение времени воздействия СВЧ-плазмы на камеру с образцом нецелесообразно.

Исследование термической утилизации куриного помета также проводилось в экспериментальной индукционной пиролизной установке мощностью 7 кВт. Экспериментальная пиролизная установка по утилизации подстилочного помета включает в себя пиролизную камеру, индукционную печь, теплообменник, ресивер-накопитель. Пиролизная реторта герметично закрывается крышкой и образует пиролизную камеру, которую устанавливали на индукционную печь через термопрокладку. Пиролизная камера соединена с теплообменником, предназначенным для охлаждения и конденсации пиролизных газов. Процесс термического разложения сопровождается выделением газообразных продуктов, которые дожигаются в СВЧ-плазме. Индукционный пиролиз проводился в инертной среде. Масса навески составляла 100 г. Скорость нагрева навески не учитывалась.

Высушенные образцы куриного помета подвергали индукционному пиролизу при четырёх различных температурах – 300, 450, 600 и 1000 °С. Пиролиз куриного помета проводился с учетом стадий его распада – гемицеллюлозы первыми подвергаются термической деструкции в интервале температур 170–260 °С, затем идет распад целлюлозы (240–350 °С) и лигнина (280–500 °С) [24]. При температурах более 600 °С образуются легкие газы, низкомолекулярные углеводороды, протекают реакции полимеризации.

Определение P_2O_5 в биоугле выполнялось колориметрическим методом Дениже в модификации А. Малюгина и С. Хреновой. Полученный биоуголь растворяли соляной кислотой. Дальнейшее определение основано на способности фосфорной кислоты давать голубое окрашивание с молибденовокислым аммонием в присутствии хлористого олова.

Для оценки результатов экспериментальных исследований использовали величину потери массы куриного помета (W , %), которая характеризует, на сколько уменьшилась масса куриного помета:

$$W = \frac{(m_0 - m_1)}{m_0} \cdot 100,$$

где m_0 – масса навески куриного помета, г; m_1 – масса полученного биоугля, г.

Результаты исследования и их обсуждение

В соответствии с разработанной методикой были проведены экспериментальные исследования по обработке подстилочного куриного помета в СВЧ-плазме. После обработки СВЧ-плазмой в тигле образовался биоуголь, который необходимо было набрать до массы в 2 г для последующего лабора-

торного химического анализа на наличие фосфора. Для этого были проведены серии опытов. Всего было выполнено 40 опытов обработки высушенного помета в СВЧ-плазме в течение 3, 4, 5, 6 и 7 минут. Фиксировалась масса отхода и масса биоугля. Температура в тигельной камере составляла 1560 °С. Биоуголь имел неравномерный кирпичный цвет к центру переходящий в графитово-черный, что свидетельствует о том, что в остатке присутствует углерод и его соединения. Биоуголь собирался в контейнеры для последующего лабораторного химического анализа на наличие фосфора. При увеличении времени обработки до 7 мин наблюдалось стеклоподобное вещество, предположительно, образовавшееся в результате спекания и перехода в аморфное состояние минеральных соединений, присутствующих в помете с подстилкой: алюмосиликатов, оксидов кремния, кальцитов и т. д. (рис. 1).



Рис. 1. Биоуголь, полученный при обработке куриного помета СВЧ-плазмой в течение 4 минут
Fig. 1. Biochar obtained by processing chicken manure with microwave plasma for 4 minutes

Полученные экспериментальные данные были проверены на однородность и достоверность. Проверка на однородность проводилась при помощи критерия Стьюдента. Фактическое значение критерия Стьюдента $t_{\text{ф}}=1,59$ меньше теоретического $t_{\text{т}}=2,02$, потеря массы куриного помета при плазменной обработке однородна. Оценка достоверности экспериментальных данных выполнена с помощью критерия χ^2 Пирсона. Гипотеза о соответствии данных нормальному закону распределения подтверждается, т. к. при 5 % уровне значимости и степени свободы 4 теоретическое значение ($\chi^2_{\text{ф}}$) меньше фактического значения критерия Пирсона ($\chi^2_{\text{т}}$), т. е. $7,58 < 9,49$.

Плазменная обработка куриного помета при температуре $T=1560$ °С в течение 7 минут позволяет уменьшить массу отхода на 92,76 %. В результате исследований установлено, что при увеличении времени обработки куриного помета СВЧ-плазмой (t , мин) при температуре $T=1560$ °С изменение массы отхода экспоненциально увеличивается с коэффициентом детерминации $R^2=0,81$ (рис. 2):

$$W=74,481e^{0,03t}.$$

Органические отходы птицеводства также были обработаны индукционным пиролизом. Масса навески высушенного куриного помета (m_0 , г) подвергалась индукционному пиролизу при различной температуре (T , °С). В результате пиролизной обработки масса навески снижалась (m_1 , г). Изменение массы куриного помета фиксировалось (W , %). Также фиксировался объем пиролизной жидкости (V , мл), длительность исследований и особенности процесса (табл. 1).

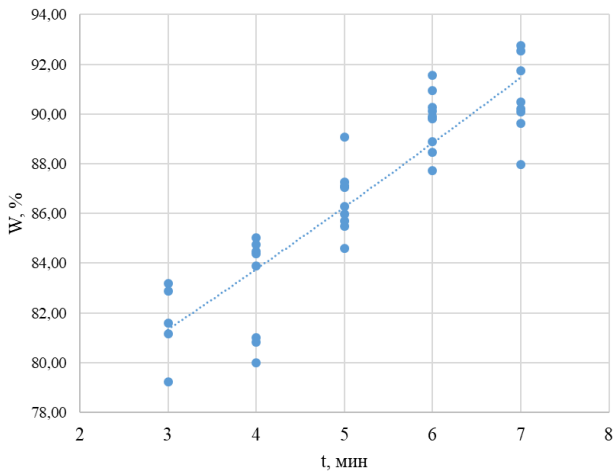


Рис. 2. Зависимость потери массы отхода (W) от времени плазменной обработки куриного помета (t , мин)
Fig. 2. Dependence of waste mass loss (W) on the time of plasma treatment of chicken manure (t , min)

Таблица 1. Результаты пиролизной обработки куриного помета

Время пиролиза (t , мин) Pyrolysis time (t , min)	Температура пиролиза (T , °С) Pyrolysis temperature (T , °C)	Масса отхода (m_0 , г) Waste mass (m_0 , g)	Масса биоугля (m_1 , г) Biochar mass (m_1 , g)	Потеря массы (W , %) Mass loss (W , %)	Объем пиролизной жидкости (V , мл) Volume of pyrolysis liquid (V , ml)
112	300	100	19,7	80,29	83,23
108	450	100	12,9	87,14	84,07
99	600	100	10,6	89,42	68,43
28	1000	100	7,7	92,30	66,37

Полученный биоуголь содержал минералы (белые включения), поэтому перед дальнейшим использованием биоугля как удобрения необходимо изучить минеральный состав и количество минералов твердого остатка. Жидкая фракция представляла собой маслянистую жидкость коричневого оттенка, которая обладала резким копченным запахом дыма (рис. 3).

Полученные экспериментальные данные однородны, т. к. фактическое значение критерия Стьюдента $t_{\phi}=1,25$ меньше теоретического $t_{\tau}=3,18$. Оценка достоверности экспериментальных данных с помощью критерия χ^2 Пирсона показала соответствие данных нормальному закону распределения, т. к. теоретическое значение меньше фактического значения Пирсона ($\chi^2_{\phi} > \chi^2_{\tau} (1,42 < 3,84)$).

Установлено, что потеря массы куриного помета (W , %) увеличивается с повышением температуры пиролизной обработки (T , °C) по линейной зависимости с коэффициентом детерминации $R^2=0,83$ (рис. 4):

$$W=0,0154T+78,2.$$



Рис. 3. Биоуголь, полученный при обработке куриного помета индукционным пиролизом при температуре 600 °C

Fig. 3. Biochar obtained during chicken manure treatment by induction pyrolysis at 600°C

В биоугле, который получен при обработке куриного помета СВЧ-плазмой, колориметрическим методом Дениже в модификации А. Малюгина и С. Хреновой определяли количество оксида фосфора. Использовалась навеска биоугля после плазменной обработки массой 2 г, общий объем вытяжки составлял 100 мл, объем вытяжки взятой для опреде-

ления 1 мл. По калибровочному графику определялось содержание P_2O_5 в исследуемом растворе. Результаты определения оптической плотности исследуемого раствора (Dx) и содержание P_2O_5 , г/100 г биоугля, представлены в табл. 2.

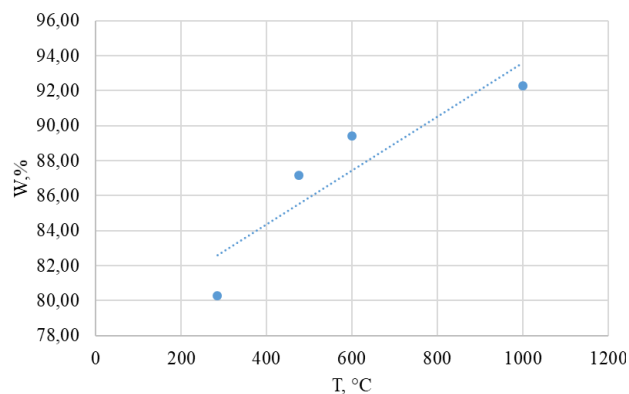


Рис. 4. Зависимость потери массы куриного помета (W , %) от температуры его индукционного пиролиза (T , °C)

Fig. 4. Dependence of chicken manure mass loss (W , %) on the temperature of its induction pyrolysis (T , °C)

Установлено, что на протяжении 7 минут плазменной обработки куриного помета содержание P_2O_5 в биоугле составляет более 50 %, что является хорошим показателем для дальнейшего производства удобрений или извлечения фосфора из биоугля. Полученные значения содержания оксида фосфора в биоугле после плазменной обработки помета кур однородны по критерию Стьюдента и достоверны по критерию χ^2 Пирсона. При обработке подстильного куриного помета плазмой при температуре 1560 °C с повышением времени обработки (t , мин) содержание оксида фосфора ($C(P_2O_5)$, г/100 г биоугля) будет экспоненциально увеличиваться по зависимости с коэффициентом детерминации $R^2=0,98$ (рис. 5):

$$C(P_2O_5)=9,542e^{0,24t}.$$

Таблица 2. Результаты исследования содержания оксида фосфора в биоугле после плазменной обработки помета кур

Table 2. Results of a study of phosphorus oxide content in biochar after plasma treatment of chicken manure

Время плазменной обработки (t , мин) Plasma treatment time (t , min)	Оптическая плотность Dx Optical density Dx	Содержание оксида фосфора в биоугле ($C(P_2O_5)$, г/100 г биоугля) Phosphorus oxide content in biochar ($C(P_2O_5)$, g/100 g biochar)
3	0,014	19,85
4	0,018	25,7
5	0,02	28,65
6	0,028	40,4
7	0,036	52,2

Таким образом, установлено, что длительность плазменной обработки куриного помета влияет на количество фосфора в биоугле после обработки. Использование СВЧ-плазмы для утилизации подстилочного куриного помета на птицефабриках позволит быстро и значительно уменьшить объем отходов и получить в достаточном количестве необходимый для удобрений компонент – фосфор.

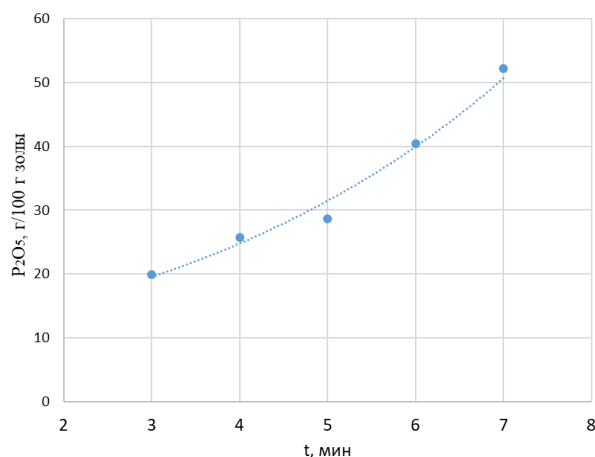


Рис. 5. Зависимость содержания оксида фосфора ($C(P_2O_5)$, г/100 г биоугля) от времени обработки куриного помета в СВЧ плазме (t , мин)

Fig. 5. Dependence of phosphorus oxide ($C(P_2O_5)$, g/100 g of biochar) content on the time of chicken manure treatment in microwave plasma (t , min)

В биоугле, который получен при индукционном пиролизе куриного помета, также определяли количество оксида фосфора колориметрическим методом Дениже в модификации А. Малюгина и С. Хреновой. Использовалась навеска биоугля после индукционного пиролиза массой 2 г, общий объем вытяжки составлял 100 мл, объем вытяжки, взятый для определения, 1 мл. По калибровочному графику определялось содержание P_2O_5 в исследуемом растворе. Результаты определения оптической плотности исследуемого раствора (Dx) и содержание P_2O_5 , г/100 г биоугля представлены в табл. 3.

Таблица 3. Результаты исследования наличия P_2O_5 в биоугле после индукционного пиролиза куриного помета

Table 3. Results of a study of P_2O_5 presence in biochar after induction pyrolysis of chicken manure

Температура индукционного пиролиза T , °C Induction pyrolysis temperature T , °C	Оптическая плотность Dx Optical density Dx	Содержание оксида фосфора в биоугле ($C(P_2O_5)$, г/100 г биоугля) Phosphorus oxide content in biochar ($C(P_2O_5)$, g/100 g biochar)
300	0,008	4,4
450	0,009	5
600	0,014	7,94
1000	0,022	12,64

Полученные значения содержания оксида фосфора в биоугле после индукционного пиролиза помета кур однородны по критерию Стьюдента и достоверны по критерию χ^2 Пирсона. На основе полученных экспериментальных данных установлено, что при повышении температуры пиролизной обработки подстилочного помета кур увеличиваются массовые значения фосфора в биоугле. Наибольшее содержание оксида фосфора наблюдается при температуре 1000 °C.

При обработке подстилочного куриного помета индукционным пиролизом с повышением температуры обработки (T , °C) содержание оксида фосфора ($C(P_2O_5)$, г/100 г биоугля) будет линейно увеличиваться по зависимости с коэффициентом детерминации 0,98 (рис. 6):

$$C(P_2O_5)=0,0124T+0,2327.$$

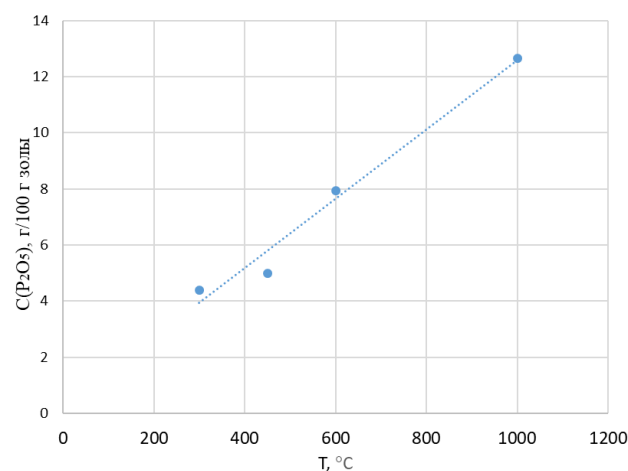


Рис. 6. Зависимость содержания P_2O_5 , г/100 г биоугля от температуры индукционного пиролиза куриного помета (T , °C)

Fig. 6. Dependence of P_2O_5 content, g/100 g of biochar, on the temperature of induction pyrolysis of chicken manure (T , °C)

Жидкая фракция, полученная после пиролизной обработки подстилочного куриного помета, содержала незначительное количество фосфора, так как отсутствовала способность фосфорной кислоты давать голубое окрашивание с молибденовокислым аммонием в присутствии хлористого олова.

Индукционный пиролиз также позволяет увеличить концентрацию фосфора в биоугле по сравнению с исходным материалом, что делает возможным использование биоугля в качестве удобрений. Однако перед использованием биоугля в качестве удобрения необходимо проводить анализ его состава и определить дозировку в зависимости от требований к почве и растениям. Удельные затраты энергии на получение 1 г оксида фосфора из кури-

ного помета при использовании экспериментальной установки СВЧ-плазмы составят 6,7 кВт, а при обработке экспериментальной установкой индукционного пиролиза составят 7,2 кВт.

Заключение

1. Эффективным способом уменьшения массы помета куриного свежего (3 класс опасности) и предотвращения загрязнения окружающей среды является обработка помета сверхвысокочастотной плазмой и индукционным пиролизом.
2. Установлено, что при обработке куриного помета в СВЧ-плазме при температуре до 1560 °C масса отходов уменьшилась на 92,76 % при длительности обработки 7 минут. При этом содержание P_2O_5 в биоугле составляет до 52,2 г/100 г биоугля. Дальнейшее время обработки приводит к остекловыванию отходов. При повышении времени обработки куриного помета СВЧ-плазмой (t, мин) при температуре $T=1560$ °C экспоненциально увеличивается потеря массы отхода (W , %) по зависимости $W=74,481e^{0,03t}$.
3. Обработка куриного помета индукционным пиролизом при температурах 300–1000 °C позволяет уменьшить массу отхода на 92,30 %. Содержание P_2O_5 в биоугле увеличивается с повышением температуры пиролиза и составляет до 12,64 г/100 г биоугля. Пиролизная жидкость не содержит исследуемого биогенного элемента. Потеря массы куриного помета (W , %) увеличивается с повышением длительности пиролизной обработки по линейной зависимости $W=0,0154T+78,2$.
4. Обработка свежего куриного помета в СВЧ-плазме с получением оксида фосфора является эффективным способом утилизации помета кур, который позволяет удалить патогенные микроорганизмы и другие вредные вещества, повышающие риск загрязнения окружающей среды, значительно и быстро снизить массу отходов, а также преобразовать помет в более безопасный и удобный для дальнейшего использования биоуголь с содержанием P_2O_5 более 50 %.
5. Индукционный пиролиз куриного помета может быть эффективным способом утилизации органических отходов и получения ценных продуктов, таких как биоуголь, жидкие углеводороды и газы. Количество фосфора, содержащегося в биоугле после пиролиза, может зависеть от многих факторов, таких как температура пиролиза, время и состав куриного помета.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zinina O., Merenkova S., Rebezov M. Analysis of modern approaches to the processing of poultry waste and by-products: prospects for use in industrial sectors // Food Science and Technology (Campinas). – 2022. – Vol. 42. – P. e03222. DOI: 10.1590/fst.03222.
2. Potapov M.A., Kurochkin A.A., Frolov D.I. Equalization of the moisture content of the mixture for obtaining fertilizers from high-moisture waste of poultry farming by extrusion // IOP Conference Series. Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 1001. – P. 012029. DOI: 10.1088/1757-899X/1001/1/012029.
3. Сведения об образовании, обработке, утилизации, обезвреживании, размещении отходов производства и потребления по форме 2-ТП (отходы) за 2022 год, систематизированные по видам отходов ФККО. URL: <https://https.rpn.gov.ru/open-service/analytic-data/statistic-reports/production-consumption-waste/> (дата обращения 20.11.2023).
4. Feasibility of the use of poultry waste as polymer additives and implications for energy, cost and carbon / T. McGauran, N. Dunne, B.M. Smyth, E. Cunningham // Journal of Cleaner Production. – 2021. – Vol. 291. – P. 125948. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.125948.
5. Запечалов М.В., Качурин В.В., Редреев Г.В. Моделирование процесса высокотемпературной сушки птичьего помета при смешанном теплообмене // Вестник Омского государственного аграрного университета. – 2021. – № 1 (41). – С. 98–108. DOI: 10.48136/2222-0364_2021_1_98.
6. Ключ В.П., Маслова Н.А. Термическая утилизация птичьего помета для получения удобрений // Альтернативная энергетика и экология (ISJAE). – 2017. – № 4–6. – С. 99–102. URL: <https://doi.org/10.15518/isjaee.2017.04-06.099-102> (дата обращения 20.11.2023).
7. Сезонный мониторинг состава и содержания тяжелых металлов в курином помете / В.И. Желтухина, С.И. Панин, М.А. Куликова, Е.Г. Котлярова // Инновации в АПК: проблемы и перспективы. – 2023. – № 2 (38). – С. 65–72. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=54186642> (дата обращения 20.11.2023).
8. Sengul H., Ozer A.K., Gulaboglu M.S. Beneficiation of Mardin-Mazıdağı (Turkey) calcareous phosphate rock using dilute acetic acid solutions // Chemical Engineering Journal. – 2006. – Vol. 122. – P. 135–140. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2006.06.005> (дата обращения 20.11.2023).
9. Экологоэнергетический показатель внедрения наилучших доступных технологий утилизации куриного помета / А.Ю. Брюханов, И.А. Субботин, Е.В. Тимофеев, А.Ф. Эрк // Экология и промышленность России. – 2019. – Т. 23. – № 12. – С. 29–33. DOI: 10.18412/1816-0395-2019-12-29-33.
10. Иванов В.В. К вопросу о решении проблем переработки и утилизации куриного помета // Теория и практика мировой науки. – 2021. – № 8. – С. 21–24. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=46619163> (дата обращения 20.11.2023).
11. Качурин В.В., Наруков Е.С., Редреев Г.В. Современные технологии переработки куриного помета // Вестник Омского государственного аграрного университета. – 2022. – № 4 (48). – С. 207–216. DOI: 10.48136/2222-0364_2022_4_207.
12. Production, characterization, activation and environmental applications of engineered biochar: a review / D. Akhil, D. Lakshmi, A. Kartik, D.V.N. Vo, J. Arun, K.P. Gopinath // Environmental Chemistry Letters. – 2021. – Vol. 19. – P. 2261–2297. URL: <https://doi.org/10.1007/s10311-020-01167-7> (дата обращения 20.11.2023).

13. Kuryntseva P., Galitskaya P., Selivanovskaya S. Optimization of pyrolysis regime for chicken manure treatment and biochar production // *Water and Environment Journal*. – 2021. – Vol. 36 (14). – P. 270–281. DOI: 10.1111/wej.12764.
14. Thermal decomposition characteristics and kinetic analysis of chicken manure in various atmospheres / X. Pu, M. Wei, X. Chen, L. Wang, L. Deng // *Agriculture*. – 2022. – Vol. 12 (5). – P. 607. DOI: 10.3390/agriculture12050607.
15. Optimization of chicken manure combustion parameters in the aspect of phosphorus recovery / A. Więckol-Ryk, B. Białecka, M. Cempa, Z. Adamczyk // *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture*. – 2020. – Vol. 9 (3). – P. 273–285. DOI: 10.30486/IJROWA.2020.1899148.1070.
16. Vance C.L. Using poultry litter ash as a fertilizer source for Bermudagrass (*Cynodon dactylon*) Establishment and loblolly pine (*Pinus taeda*) plantation // *LSU Doctoral Dissertations*. Louisiana State University and Agricultural and Mechanical College. – 2019. – 91 p. URL: https://digitalcommons.lsu.edu/gradschool_dissertations/5099 (дата обращения 20.11.2023).
17. Ischia G., Fiori L. Hydrothermal carbonization of organic waste and biomass: a review on process, reactor, and plant modeling // *Waste Biomass Valorization*. – 2021. – Vol. 12. – P. 2797–2824. DOI: 10.1007/s12649-020-01255-3.
18. Evaluation of poultry manure: combination of phosphorus recovery and activated carbon production / N. S. Topcu, G. Duman, H. Olgun, J. Yanik // *ACS Omega*. – 2022. – Vol. 7 (24). – P. 20710–20718. DOI: 10.1021/acsomega.2c00975.
19. Phosphorus recovery from municipal sludge-derived ash and hydrochar through wet-chemical technology: a review towards sustainable waste management / H. Liu, G. Hu, I. A. Basar, J. Li, N. Lyczko, A. Nzihou, C. Eskicioglu // *Chemical Engineering Journal*. – 2021 – Vol. 417. – P. 129300. DOI: 10.1016/j.cej.2021.129300.
20. Geopolymers based on plasma incineration waste as a material for circular economy / K. Setlak, B. Figiela, A. Grela, K. Buczkowska // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2021 – Vol. 942. – P. 012008. DOI: 10.1088/1755-1315/942/1/012008.
21. Козырь Д.А., Шаповалов В.В. Ресурсосберегающая технология утилизации породных отвалов горнодобывающих производств // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2023. – Т. 334. – № 4. – С. 175–184. DOI: 10.18799/24131830/2023/4/3965.
22. Козырь Д.А. Оценка воспламеняемости дисперсных компонентов отходов горнодобывающей промышленности // *Безопасность труда в промышленности*. – 2023. – Т. 2. – С. 42–47. DOI: 10.24000/0409-2961-2023-2-42-47.
23. ГОСТ 26713-85. Удобрения органические. Метод определения влаги и сухого остатка. – М.: Госстандарт СССР, 1986. – 6 с.
24. Кузнецов Б.Н. Каталитическая химия растительной биомассы // *Соросовский образовательный журнал*. – 1996. – Т. 12. – С. 47–55. URL: https://www.pereplet.ru/nauka/Soros/pdf/9612_047.pdf (дата обращения 20.11.2023).

Информация об авторе

Дмитрий Александрович Козырь, кандидат технических наук, доцент кафедры радиоэкологии и экологической безопасности Севастопольского государственного университета, Россия, 299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33. kozyr.dmitriy@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-1679-8083>

Поступила в редакцию: 06.12.2023

Поступила после рецензирования: 23.01.2024

Принята к публикации: 19.06.2024

REFERENCES

1. Zinina O., Merenkova S., Rebezov M. Analysis of modern approaches to the processing of poultry waste and by-products: prospects for use in industrial sectors. *Food Science and Technology (Campinas)*, 2022, vol. 42, pp. e03222. DOI: 10.1590/fst.03222.
2. Potapov M.A., Kurochkin A.A., Frolov D.I. Equalization of the moisture content of the mixture for obtaining fertilizers from high-moisture waste of poultry farming by extrusion. *IOP Conference Series. Materials Science and Engineering*, 2020, vol. 1001, pp. 012029. DOI: 10.1088/1757-899X/1001/1/012029.
3. *Information on generation, processing, disposal, neutralization, disposal of production and consumption waste in form 2-TP (waste) for 2022, systematized by type of waste FKKO*. (In Russ.) Available at: <https://https.rpn.gov.ru/open-service/analytic-data/statistic-reports/production-consumption-waste/> (accessed 20 November 2023).
4. McGauran T., Dunne N., Smyth B.M., Cunningham E. Feasibility of the use of poultry waste as polymer additives and implications for energy, cost and carbon. *Journal of Cleaner Production*, 2021, vol. 291, pp.125948. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.125948.
5. Zapevalov M.V., Kachurin V.V., Redreev G.V. Simulation of the process for the high-temperature drying of bird manure with mixed heat exchange. *Bulletin of Omsk State Agrarian University*, 2021, vol. 1, no. 41, pp. 98–108. (In Russ.) DOI: 10.48136/2222-0364_2021_1_98
6. Klius V.P., Maslova N.A. Thermal utilization of bird manure for fertilizers. *Alternative Energy and Ecology (ISJAE)*, 2017, vol. 4–6, pp. 99–102. (In Russ.) Available at: <https://doi.org/10.15518/isjaee.2017.04-06.099-102> (accessed 20 November 2023).
7. Zheltukhina V.I., Panin S.I., Kulikova M.A., Kotlyarova E.G. Seasonal monitoring of composition and content of heavy metals in chicken manure. *Innovations in agriculture: problems and prospects*, 2023, vol. 38, no. 2, pp. 65–72. (In Russ.) Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=54186642> (accessed 20 November 2023).
8. Sengul H., Ozer A.K., Gulaboglu M.S. Beneficiation of Mardin-Mazıdaği (Turkey) calcareous phosphate rock using dilute acetic acid solutions. *Chemical Engineering Journal*, 2006, vol. 122, pp.135–140. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2006.06.005> (accessed 20 November 2023).

9. Bryuchanov A.Yu., Subbotin I.A., Timofeev E.V., Erk A.F. Ecological and energy indicator of the implementation of the best available technologies for the disposal of poultry manure. *Ecology and Industry of Russia*, 2019, vol. 23, no. 12, pp. 29–33. (In Russ.) DOI: 10.18412/1816-0395-2019-12-29-33.
10. Ivanov V.V. On the issue of solving the problems of processing and disposal of chicken litter. *Theory and practice of world science*, 2021, vol. 8, pp. 21–24. (In Russ.) Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=46619163> (accessed 20 November 2023).
11. Kachurin V.V., Narukov E.S., Redreev G.V. Modern technologies for processing chicken manure. *Bulletin of Omsk State Agrarian University*, 2022, vol. 48, no. 4, pp. 207–216. (In Russ.) DOI: 10.48136/2222-0364_2022_4_207
12. Akhil D., Lakshmi D., Kartik A., Vo D.V.N., Arun J., Gopinath K.P. Production, characterization, activation and environmental applications of engineered biochar: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 2021, vol. 19, pp. 2261–2297. Available at: <https://doi.org/10.1007/s10311-020-01167-7> (accessed 20 November 2023).
13. Kuryntseva P., Galitskaya P., Selivanovskaya S. Optimization of pyrolysis regime for chicken manure treatment and biochar production. *Water and Environment Journal*, 2021, vol. 36, no. 14, pp. 270–281. DOI: 10.1111/wej.12764.
14. Pu X., Wei M., Chen X., Wang L., Deng L. Thermal decomposition characteristics and kinetic analysis of chicken manure in various atmospheres. *Agriculture*, 2022, vol. 12, no. 5, pp. 607. DOI: 10.3390/agriculture12050607.
15. Więckol-Ryk A., Białecka B., Cempa M., Adamczyk Z. Optimization of chicken manure combustion parameters in the aspect of phosphorus recovery. *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture*, 2020, vol. 9, no. 3, pp. 273–285. DOI: 10.30486/IJROWA.2020.1899148.1070.
16. Vance C.L. *Using poultry litter ash as a fertilizer source for Bermudagrass (Cynodon dactylon) Establishment and loblolly pine (Pinus taeda) plantation*. LSU Dr. Diss. Louisiana, 2019. 91 p. Available at: https://digitalcommons.lsu.edu/gradschool_dissertations/5099 (accessed 20 November 2023).
17. Ischia G., Fiori L. Hydrothermal carbonization of organic waste and biomass: a review on process, reactor, and plant modeling. *Waste Biomass Valorization*, 2021, vol. 12, pp. 2797–2824. DOI: 10.1007/s12649-020-01255-3.
18. Topcu N.S., Duman G., Olgun H., Yanik J. Evaluation of poultry manure: combination of phosphorus recovery and activated carbon production. *ACS Omega*, 2022, vol. 7, no. 24, pp. 20710–20718. DOI: 10.1021/acsomega.2c00975.
19. Liu H., Hu G., Basar I.A., Li J., Lyczko N., Nzihou A., Eskicioglu C. Phosphorus recovery from municipal sludge-derived ash and hydrochar through wet-chemical technology: a review towards sustainable waste management. *Chemical Engineering Journal*, 2021, vol. 417, pp. 129300. DOI: 10.1016/j.cej.2021.129300.
20. Setlak K., Figiela B., Grela A., Buczkowska K. Geopolymers based on plasma incineration waste as a material for circular economy. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, vol. 942, pp. 012008. DOI: 10.1088/1755-1315/942/1/012008.
21. Shapovalov V.V., Kozyr D.A. Resource-saving technology for utilization of waste dumps of mining industries. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2023, vol. 334, no. 4, pp. 175–184. (In Russ.) DOI: 10.18799/24131830/2023/4/3965.
22. Kozyr D.A. Assessment of the flammability of dispersed components of the mining industry waste. *Occupational Safety in Industry*, 2023, vol. 2, pp. 42–47. (In Russ.) DOI: 10.24000/0409-2961-2023-2-42-47.
23. SS 26713-85. *Fertilizers are organic. Method for determining humidity and dry residue*. Moscow, Gosstandart Publ., 1986. 6 p. (In Russ.)
24. Kuznetsov B.N. Catalytic chemistry of plant biomass. *Soros Educational Journal*, 1996, vol. 12, pp. 47–55. (In Russ.) Available at: https://www.pereplet.ru/nauka/Soros/pdf/9612_047.pdf (accessed 20 November 2023).

Information about the author

Dmitriy A. Kozyr, Cand Sc., Associate Professor, Sevastopol State University, 33, Universitetskaya street, Sevastopol, 299053, Russian Federation. kozyr.dmitriy@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-1679-8083>

Received: 06.12.2023

Revised: 23.01.2024

Accepted: 19.06.2024

УДК 553.08:553.21/24:553.046
DOI: 10.18799/24131830/2024/8/4708
Шифр специальности ВАК: 1.6.10

Комплексное исследование распределения теллуро-висмутовой минерализации в рудах колчеданных месторождений Абыз и Малеевское (Республика Казахстан)

А.Н. Николаева✉, А.К. Мазуров

Национальный Исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск

✉nikolaevaanastas759@gmail.com

Аннотация. В пределах образований энзиматических и энсиалических островных дуг на территории Центрального и Восточного Казахстана насчитывается более тридцати колчеданных месторождений, обогащенных медью, свинцом, цинком, золотом, серебром и редкометальной минерализацией, являющейся до настоящего времени недостаточно изученной. **Актуальность** исследования заключается в необходимости восполнения информации о теллуро-висмутовой минерализации в рудах колчеданных месторождений, сформированных в энзиматической (месторождение Абыз) и энсиалической (месторождение Малеевское) островодужных системах, для установления пространственной связи данного типа оруденения с геодинамическими обстановками и прогнозирования потенциала их попутного извлечения из руд. **Целью** работы являлось изучение и сравнение морфологических характеристик, закономерностей распределения и условий формирования теллуро-висмутовой минерализации в рудах колчеданных месторождений, образованных в разных островодужных геодинамических обстановках. **Методы:** масс-спектрометрия с индуктивно-связанной плазмой, минераграфический и минералогический анализы, сканирующая электронная микроскопия в комплексе с рентгеноспектральным микроанализом, рамановская спектроскопия, термобарогеохимические исследования. **Результаты.** Сравнение колчеданных месторождений Рудноалтайской и Чингиз-Тарбагатайской островодужных систем показало многие черты их сходства и различия. Месторождения имеют многостадийное формирование и близкий механизм рудоотложения со сходными условиями образования теллуро-висмутовой минеральной ассоциации. Установлена пространственная связь данного типа оруденения с геодинамическими обстановками: для месторождения, приуроченного к палеоокеанической структуре, наблюдается преобладание теллурического элемента, а для месторождения, сформированного на континентальном рифте – висмутового.

Ключевые слова: теллур, висмут, колчеданные месторождения, Казахстан, Рудноалтайская и Чингиз-Тарбагатайская островные дуги

Благодарности: исследование выполнено при финансовой поддержке проекта FSWW-2023-0010.

Для цитирования: Николаева А.Н., Мазуров А.К. Комплексное исследование распределения теллуро-висмутовой минерализации в рудах колчеданных месторождений Абыз и Малеевское (Республика Казахстан) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 8. – С. 197–214. DOI: 10.18799/24131830/2024/8/4708

UDC 53.08:553.21/24:553.046
DOI: 10.18799/24131830/2024/8/4708

Comprehensive research of the distribution of tellurium-bismuth mineralization in the ores of the Abyz and Maleevskoe sulfide deposits (Republic of Kazakhstan)

A.N. Nikolaeva✉, A.K. Mazurov

National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

✉nikolaevaanastas759@gmail.com

Abstract. Within the formations of ensimatic and ensialic island arcs in the territory of Central and Northern Kazakhstan, there are more than thirty pyrite deposits enriched in copper, lead, zinc, gold, silver and rare metal mineralization, which is still insufficiently studied. **Relevance.** The need to replenish information on tellurium-bismuth mineralization in ores of sulfide deposits formed in ensimatic (Abyz deposit) and ensialic (Maleevskoe deposit) island-arc systems, to establish a spatial connection of this type of mineralization with geodynamic conditions and predict the potential for their associated extraction from ore. **Aim.** To study and compare morphological characteristics, distribution patterns and conditions for the formation of tellurium-bismuth mineralization in ores of pyrite deposits formed in different island-arc geodynamic settings. **Methods.** Inductively coupled plasma mass spectrometry, mineragraphic and mineralogical analyses, scanning electron microscopy in combination with X-ray spectral microanalysis, Raman spectroscopy, thermobarogeochemical studies. **Results.** A comparison of the pyrite deposits of the Rudno-Altai and Chingiz-Tarbagatai island arc systems showed many similarities and differences between them. The deposits have a multi-stage formation and a similar mechanism of ore deposition with similar physico-chemical conditions for the formation of tellurium-bismuth mineralization. A spatial relationship between Te-Bi mineralization and geodynamic settings was established: for deposits associated with paleoceanic structures, a predominance of the tellurium element is observed, and for continental rifts, a predominance of the bismuth element.

Keywords: tellurium, bismuth, pyrite deposits, Kazakhstan, Rudno-Altai and Chingiz-Tarbagatai island arcs

Acknowledgments: The research was carried out within the framework of the State assignment «Science № FSSWW-2023-0010».

For citation: Nikolaeva A.N., Mazurov A.K. Features of tellurium-bismuth mineralization in ores of the Abyz and Maleevskoe purific deposits (Republic of Kazakhstan). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 8, pp. 197–214. DOI: 10.18799/24131830/2024/8/4708

Введение

Одним из приоритетных направлений Государственной политики в области недропользования является стратегия комплексного использования руд. Для эффективной эксплуатации рудного сырья в производстве важно знать его минеральный состав и точное содержание примесей, которые в настоящее время свободно определяются современными аналитическими методами. Этот факт дает возможность оптимизации качества конечного продукта, что, в свою очередь, повышает эффективность и рентабельность производства цветных металлов.

Во многих работах по исследованию территории Казахстана [1–9] сделаны акценты на изучение и увязку особенностей металлогении месторождений с разнотипными геодинамическими обстановками. Среди прочего отмечается, что наиболее богатыми элементами-примесями являются колчеданные руды месторождений, приуроченных к палеоостроводужным геодинамическим обстановкам. В 70–90-х гг. прошлого столетия по причине отсутствия необходимого оборудования в большинстве месторождений данного типа оставались слабо изученными примесные элементы, являющиеся востребованными промышленностью и имеющие высокую рыночную стоимость. Среди данных элементов-примесей до сих пор остаются слабоизученными металлоид теллур и металл висмут.

Характерной чертой Центрально-Азиатского орогенного пояса является широкое распространение вулканических комплексов, сформировавшихся в пределах островодужных систем с различным типом фундамента. При этом значительные площа-

ди занимают образования энсиматических островных дуг, среди которых Чингиз-Тарбагатайская островодужная система, формировавшаяся на протяжении кембрия и ордовика, является наиболее крупной подобной структурой западной части Центрально-Азиатского пояса. Именно в ней сконцентрированы основные промышленные колчеданные месторождения Центрального Казахстана [9].

Формирование основных промышленных колчеданных месторождений Рудного Алтая происходило с кембрия по девон в геодинамической обстановке, соответствующей зрелым внутренним островным дугам, по металлогеническому районированию объединяющимся в региональный Рудноалтайский пояс, представляющий собой активную континентальную окраину Алтае-Саянской складчатой области [10–13].

На основании имеющихся данных целью работы является изучение и сравнение условий формирования и закономерностей распределения теллуру-висмутовой минерализации в рудах колчеданных месторождений, приуроченных к разным геодинамическим обстановкам. Для этого нами были изучены руды двух колчеданных месторождений:

- месторождения Абыз, сформированного в пределах энсиматической Чингиз-Тарбагатайской островной дуги, развивающейся на океанической коре;
- месторождения Малеевское, приуроченного к энсиалической Рудноалтайской островной дуге, заложенной на коре континентального типа (рис. 1).

Для выполнения данного исследования были поставлены три основные задачи:

- изучить особенности минерального состава колчеданных руд и дать характеристику распределению основных рудных и сопутствующих примесных элементов в рудах;
- реконструировать стадийность процесса минералообразования и определить физико-химические условия формирования теллуро-висмутовой минерализации;
- дать прогнозно-металлогеническую оценку теллур-висмут-сырьевого потенциала для колчеданных месторождений, приуроченных к островодужным палеогеодинамическим обстановкам.

Решение этих вопросов весьма важно и актуально как в научном, так и в прикладном отношении. Помимо этого, с экологической точки зрения необходимость извлечения данных элементов из

руд заключается в их токсичности и существенном вкладе в деградацию почвенного покрова [14, 15]. Несмотря на то, что экологические последствия загрязнения почв висмутом (Bi) и теллуром (Te) исследованы весьма мало, масштабы и степень загрязнения ими почв с каждым годом увеличиваются. Шлаки, образующиеся в результате плавки руд и концентратов, вместе с хвостохранилищами все чаще становятся предметом серьезных экологических споров. Единственным способом снижения их негативного воздействия на окружающую среду может быть утилизация путем комплексного извлечения из руд и дальнейшего применения в качестве товарных продуктов (сплавы, термоэлектрические материалы, узкозонные полупроводники, производство пигментов, керамики и многое другое).

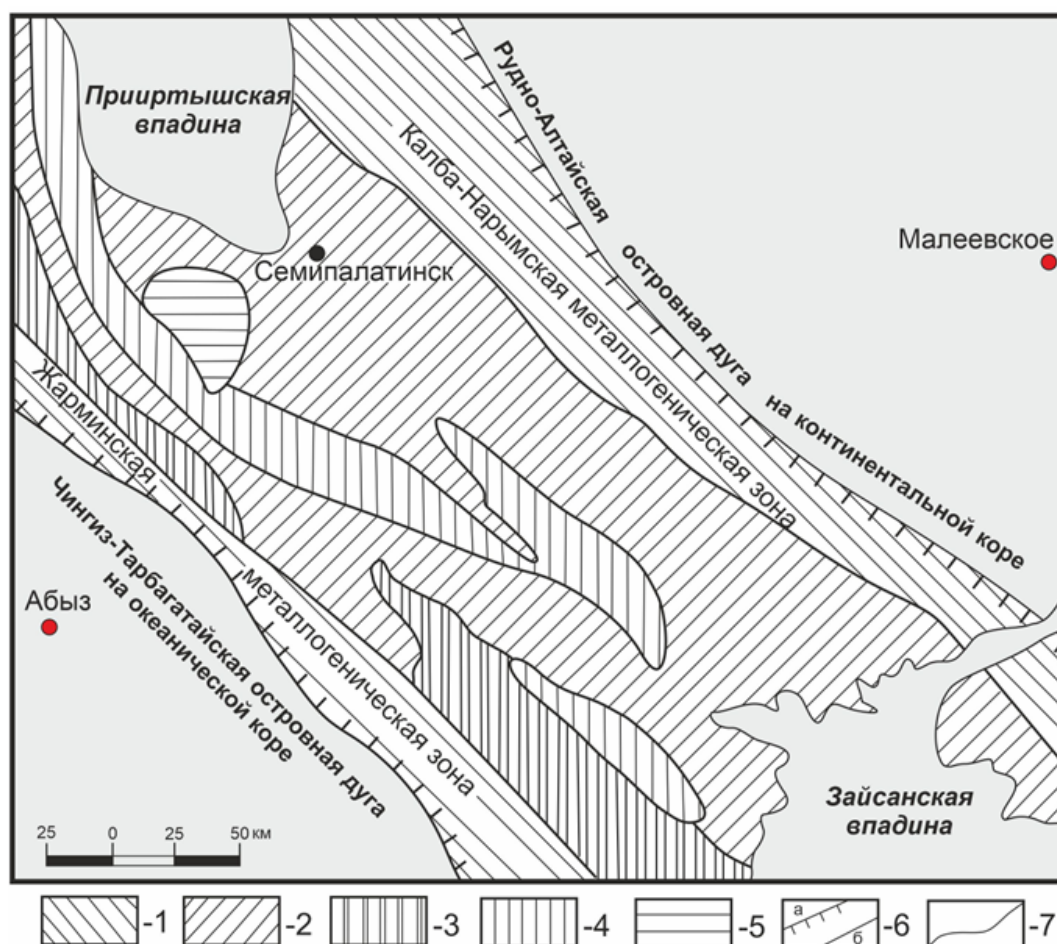


Рис. 1. Схематическое металлогеническое районирование Восточной и Центральной части Казахстана [2] с дополнениями. Условные обозначения: 1 – энсиалические блоки зоны коллизии, 2 – энсиматические блоки зоны коллизии, 3 – террейны карбоновой островной дуги, 4 – сутура коллизионной зоны, 5 – область триасового континентального магматизма, 6 – границы коллизионной зоны (а) и блоков на различном основании (б), 7 – прочие геологические границы

Fig. 1. Schematic metallogenetic zoning of the Eastern and Central parts of Kazakhstan [2] with additions. Legend: 1 – ensialic blocks of the collision zone, 2 – ensimatic blocks of the collision zone, 3 – terranes of the Carboniferous Island arc, 4 – suture of the collision zone, 5 – area of Triassic continental magmatism, 6 – boundaries of the collision zone (a) and blocks on different foundations (b), 7 – other geological boundaries

Материал и методы исследования

Для решения поставленных задач из основных рудных тел месторождений Абыз и Малеевское были отобраны и изучены бороздовые и керновые пробы в количестве 210 единиц весом от одного до трех килограммов. В ходе научной работы применялся целый комплекс исследований. На первом этапе проводилось макроскопическое описание образцов для характеристики текстурных особенностей руд. Далее с целью изучения минерального состава, морфологии, размеров и характера сростания минералов, а также структурных особенностей руд на исследовательском микроскопе отраженного света Zeiss Imager 2m были выполнены минераграфические исследования, для которых было изготовлено около 200 полированных шлифов (аншлифов). Для углубления знаний о морфологии теллуру-висмутовой минерализации и ее взаимосвязи с другими минералами было проведено изучение руд на сканирующем электронном микроскопе Tescan Vega 3 SBU с приставкой для рентгенфлуоресцентного энергодисперсионного анализа (ЭДС) OXFORD X-Max 50. В процессе исследования осуществлялась съемка поверхности руд и качественное определение состава зёрен по всей площади. Особое внимание уделялось разнообразным включениям минералов Те и Вi и взаимоотношению их с другими минеральными единицами. На предмет расшифровки условий образования теллуру-висмутовой минерализации были определены термодатметрические характеристики более 80 газово-жидких включений в жильном кварце с использованием комплекса термобарогеохимических методов. Опыты по нагреванию выполнены с помощью термокамеры THMSG-600 с программным обеспечением LinkSys-32 (Linkam). Прибор позволяет выполнить измерение фазовых переходов температур в интервале от -200 до $+600$ °C. Для определения состава газов во включениях использовался спектрометр комбинационного рассеяния с конфокальным микроскопом Thermo Scientific Raman Microscope DXR2. Для выявления примесных элементов и установления их содержания (ppm) в рудах была проведена масс-спектрометрия с индуктивно-связанной плазмой на масс-спектрометре Delta V Plus (Thermo Fisher Scientific, Бремен, Германия) в Казанском (Приволжском) Государственном университете.

Геологическое строение месторождений

Месторождение Абыз находится в западной части Предчингизской зоны в области ее сочленения со структурами Токраурского синклинория, разделенными меридиональным Центрально-Казахстанским разломом. Стратифицированные образования на месторождении представлены девонскими и неогено-

выми отложениями, а также рыхлыми четвертичными образованиями [16–18]. Рудовмещающей является вулканогенно-терригенная толща девонского возраста мощностью до 975 м, сложенная разнообломочными туфами андезитов, андезитобазальтов и их лавами с прослоями песчаников и гравелитов. Субвулканические образования, развитые в юго-восточной части месторождения, представлены среднедевонскими риолитами, трахидацитами, дацитами и гранит-порфирами. Для месторождения характерна сложная система разновозрастных тектонических нарушений, которые являются оперяющими структурами долгоживущего Центрально-Казахстанского глубинного разлома. Породы на месторождении претерпели процессы динамометаморфизма, а также подверглись гидротермально-метасоматическим изменениям, которые относятся к тектогенным региональным формациям и представлены пропиловыми и березитовыми статическими устойчивыми ассоциациями. Оруденение связано с протяжённой зоной березитизации по вулканогенно-осадочным породам среднего-основного состава, а также их туфогенным производным и осадочным отложениям [17, 18].

Месторождение Малеевское располагается в Зыряновском рудном районе Лениногорско-Зыряновской подзоны Рудно-Алтайской структурно-формационной зоны [6, 19, 20]. В геологическом строении месторождения участвуют среднедевонские вулканогенно-осадочные отложения. Разрез насыщен субвулканическими согласными и секущими телами порфировых риолитов, а также силлами и дайками базитов. В западном обрамлении рудного поля развиты интрузии габброидов и гранитоидов Змеиногорского комплекса. Тектоника представлена разрывными нарушениями северо-восточного простирания, характеризующимися зонами трещиноватости. В течение длительного геологического развития породы рудного поля претерпели различные метаморфические изменения: региональный, динамометрический, контактовый и гидротермальный метаморфизм. Рудообразование пространственно приурочено к березитовой формации [19, 20]. Оруденение локализуется в отложениях, сложенных известковистыми и углеродистыми песчаниками, алевролитами и алевропелитами, содержащими многочисленные силлы диабазов, тела риолитов и их лавобрекчий.

Результаты исследования

Морфологическая характеристика Те-Vi-содержащих минералов

С целью выявления примесных элементов в рудах месторождений Малеевское и Абыз была проведена масс-спектрометрия с индуктивно-связанной плазмой.

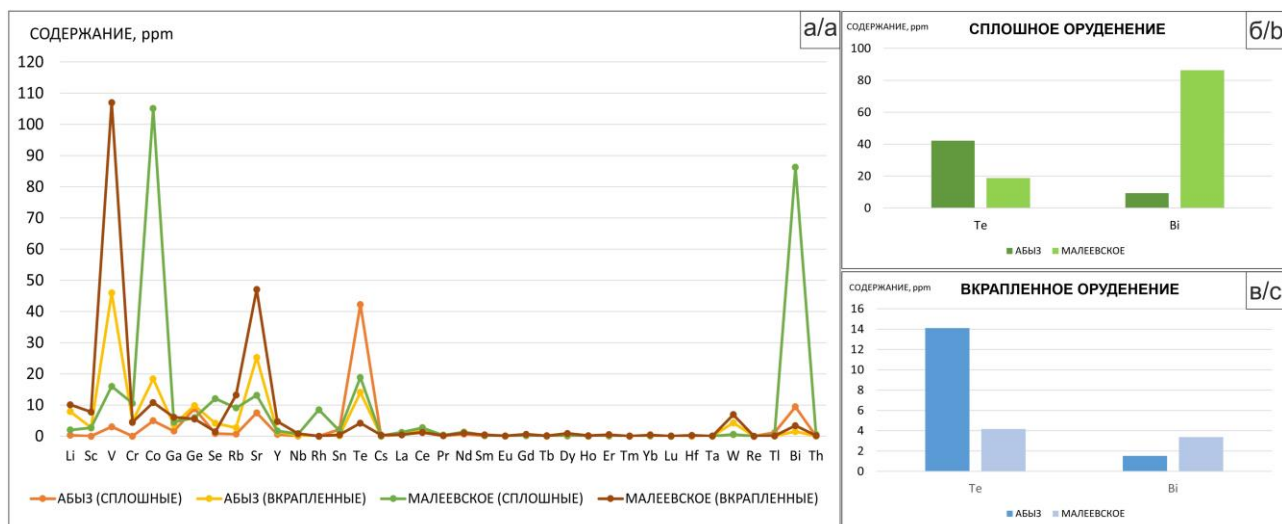


Рис. 2. а) график содержания элементов-примесей в рудах месторождений Абыз и Малеевское; б, в) сравнительные диаграммы содержания теллура и висмута в сплошных (б) и вкрапленных (в) рудах месторождений

Fig. 2. а) graph of the content of trace elements in the ores of the Abyz and Maleevskoe deposits; б, в) comparative diagrams of tellurium and bismuth content in solid (b) and disseminated (c) ores of the deposits

Анализ показал широкий спектр редких примесных элементов (рис. 2), среди которых одними из преобладающих по содержанию являются полуметалл теллур и металл висмут. При этом стоит отметить, что при сравнении содержаний данных компонентов в рудах для месторождения Абыз фиксируется преобладание Te (рис. 2, б), а для Малеевского – Bi (рис. 2, в).

Колчеданные руды месторождений Абыз (островная энсиматическая дуга) и Малеевское (островная энсиалическая дуга) имеют сходные текстурно-структурные характеристики и минеральный состав, но различаются количественными параметрами рудных минералов и элементным составом. Для месторождений наблюдаются аналогичные текстурные типы оруденения: сплошной (сливной) и вкрапленный [17].

Сплошные (сливные) руды на месторождении Абыз являются более распространенным типом оруденения и на 95–98 % сложены такими сульфидными минералами, как пирит FeS_2 , халькопирит CuFeS_2 , галенит PbS , сфалерит ZnS , спорадически тетраэдрит (минерал группы блеклых руд) $(\text{Cu,Fe})_{12}\text{Sb}_4\text{S}_{13}$. В минеральном составе преобладают пирит и халькопирит, суммарно составляющие от 70 до 90 % объема рудной массы. Распределение данных минералов в руде неравномерное, при этом обычно халькопирит доминирует над пиритом. Нерудные минералы, составляющие не более 5 % объема сплошных руд, представлены кварцем и анкеритом. В качестве редких и акцессорных минералов в сплошных рудах диагностированы арсенопирит FeAsS , рутил TiO_2 , электрум AuAg , самородное золото Au , ильменит FeTiO_3 , алтаит

PbTe , касситерит SnO_2 , теллуrowисмутит Bi_2Te_3 , кюстелит AgAu , самородная медь Cu , раклиджит $(\text{Bi, Pb})_3\text{Te}_4$, циркон ZrSiO_4 , лаутит CuAsS , ченгуодаит $\text{Ag}_9\text{FeTe}_2\text{S}_4$, гессит Ag_2Te , штютцит Ag_5Te_3 , петцит Ag_3AuTe_2 , калаверит AuTe_2 , колорадоит HgTe , монацит $(\text{Ce, La, Nd, Th})[\text{PO}_4]$ и тернемобит $(\text{Ce})-(\text{Ce, La, Nd})_2\text{Al}(\text{SiO}_4)_2(\text{OH})$.

Вкрапленные руды примерно на 30–40 % сложены сульфидными и на 60–70 % – нерудными минералами. В составе сульфидов преобладают пирит и сфалерит, суммарно составляющие до 35–38 % рудной массы. В меньшем объеме в рудах данного типа диагностируются халькопирит и галенит. Нерудные минералы представлены кварцем и анкеритом, при этом в большем объеме в рудах распространены кварц. В качестве редких и акцессорных минералов выявлены рутил TiO_2 , электрум AuAg , самородное золото Au , циркон ZrSiO_4 , теллуrowисмутит Bi_2Te_3 , раклиджит $(\text{Bi, Pb})_3\text{Te}_4$, калаверит AuTe_2 , гессит Ag_2Te , штютцит Ag_5Te_3 и монацит $(\text{Ce, La, Nd, Th})[\text{PO}_4]$.

По отношению к вмещающим породам промышленное оруденение месторождения Абыз считается эпигенетическим. Руды являются поликомпонентными и в качестве редких в них отмечаются минералы теллуrowисмутового состава: алтаит (PbTe), гессит (Ag_2Te), теллуrowисмутит (Bi_2Te_3), раклиджит $((\text{Bi, Pb})_3\text{Te}_4)$, петцит (Ag_3AuTe_2), колорадоит (HgTe). Впервые в рудах были диагностированы штютцит (Ag_5Te_3), ченгуодаит ($\text{Ag}_9\text{FeTe}_2\text{S}_4$) и калаверит (AuTe_2).

До 83 % выявленной минерализации приурочено к сплошному типу оруденения, где отмечаются такие минеральные виды, как алтаит, штютцит, гессит,

теллуrowисмутит, ченгуодаит, раклиджит, петцит, калаверит и колорадоит. Вкрапленный тип оруденения содержит в себе до 17 % диагностированных минеральных агрегатов Te-Bi состава, представленных алтаитом, гесситом, теллуrowисмутитом, раклиджитом, штютцитом и калаверитом [21, 22].

Минералы Te-Bi состава по химическому составу разделены нами на четыре системы (табл. 1). Для них выявлено многообразие форм выделения, а также общее сходство – приуроченность к сульфидным минералам.

Алтаит (PbTe), являющийся теллуридом свинца из группы галенита, – самый распространенный минерал Te-Bi минерализации. Диагностирован как в сплошном, так и во вкрапленном типе оруденения. Выявленные агрегаты отмечаются в мономи-

неральном виде, формируясь в пустотах и трещинах в пирите, халькопирите и сфалерите. Агрегаты характеризуются округлыми, овальными и каплевидными формами выделения (рис. 3, а). Также наблюдаются просечковидные формы, образовавшиеся в результате заполнения минералом трещин в минералах-хозяевах, представленных пиритом и халькопиритом. Агрегаты уплощенные, соотношение их длины и ширины составляет 15:1, при этом средняя длина составляет 10 мкм. Агрегаты овальных, каплевидных и амебообразных форм чаще всего приурочены к сфалериту, халькопириту или к контакту пирита и халькопирита. Размерность включений варьирует в пределах 1,4–18 мкм. Спорадически алтаит создает ансамбли с гесситом в зернах пирита.

Таблица 1. Общая характеристика минералов Te-Bi состава на месторождении Абыз
Table 1. General characteristics of minerals of Te-Bi composition at the Abyz deposit

Минерал Mineral	Рассчитанные усредненные формульные коэффициенты [21] Calculated average formula coefficients [21]	Минерал-хозяин Host mineral	Форма выделения Selection form	Примеси (усредненные значения) Impurities (average values)	Приуроченность к текстурно-структурному типу оруденения Confinement to the textural-structural type of mineralization
Система Pb-Bi-Te/Pb-Bi-Te system					
Алтаит Altaite	$Pb_{1.01}Te_{1.00}$	Пирит, халькопирит, сфалерит Pyrite, chalcopyrite, sphalerite	Угловатая, неправильная, амебообразная, просечковидная Angular, irregular, amoeba-shaped, perforated	Ag (3,59 %)	Сплошной Solid
Теллуrowисмутит Tellurobismuthite	$Bi_{1.90}Te_{3.00}$	Пирит Pyrite	Угловатая, слабоизометричная со скошенными углами, овальная, каплевидная Angular, slightly isometric with beveled corners, oval, teardrop-shaped	–	Сплошной, вкрапленный Solid, interspersed
Раклиджит Raklijite	$(Bi_{2.26}, Pb_{0.75})_{3.01}Te_{4.00}$	Халькопирит, пирит, сфалерит Chalcopyrite, pyrite, sphalerite	Неправильная, слабоизометричная Irregular, weakly isometric	Ag (1,60 %) Cu (0,78 %) Fe (0,29 %)	Сплошной, вкрапленный Solid, interspersed
Система Ag-Te, Fe, S/Ag-Te, Fe, S system					
Ченгуодаит Chenguodayite	$Ag_{8.93}Fe_{0.99}Te_{1.98}S_{4.00}$	Халькопирит Chalcopyrite	Неправильная, округлая Irregular, round	–	Сплошной Solid
Гессит Gessite	$Ag_{2.01}Te_{1.00}$	Пирит, халькопирит Pyrite, chalcopyrite	Неправильная, округлая, просечковидная Irregular, round, perforated	–	Сплошной, вкрапленный Solid, interspersed
Штютцит Stuttzite	$Ag_{4.70}Te_{3.00}$	Халькопирит, пирит, кварц Chalcopyrite, pyrite, quartz	Каплевидная, округлая, просечковидная Drop-shaped, rounded, perforated	–	Сплошной, вкрапленный Solid, interspersed
Система Ag-Au-Te/Ag-Au-Te system					
Петцит Petzite	$Ag_{3.00}Au_{1.00}Te_{2.00}$	Пирит, халькопирит, кварц Pyrite, chalcopyrite, quartz	Слабоизометричная, неправильная, округлая Weakly isometric, irregular, rounded	–	Сплошной Solid
Калаверит Calaverite	$Au_{0.98}Te_{2.00}$	Пирит Pyrite	Овальная, каплевидная, округлая Oval, teardrop-shaped, round	–	Сплошной, вкрапленный Solid, interspersed
Система Hg-Te/Hg-Te system					
Колорадоит Coloradoite	$Hg_{1.00}Te_{1.00}$	Халькопирит, пирит, сфалерит Chalcopyrite, pyrite, sphalerite	Угловатая, неправильная Angular, irregular	–	Сплошной Solid

Гессит (Ag_2Te) – второй по распространенности минерал теллуру-висмутовой минерализации, обнаруженный в оруденении как сплошного, так и вкрапленного типа, при этом в первом типе отмечается большее количество агрегатов минерала. Теллурид серебра представлен в виде зернистых, неправильных, слабоокруглых агрегатов без каких-либо признаков кристаллографической огранки. Минерал сосредоточен преимущественно в трещинах и пустотах пирита (рис. 3, б) и халькопирита, спорадически заполняет интерстиции между данными сульфидами. Средний размер агрегатов варьирует в диапазоне 2–4 мкм. Зачастую гессит представлен в виде включений каплевидных форм размером до 0,5–1 мкм.

Петцит (Ag_3AuTe_2) является третьим по распространенности минералом, приуроченным исключительно к сплошному типу оруденения. В разрезе характеризуется неправильными включениями трапецевидных, прямоугольных и угловатых форм. Для теллурида наблюдается характерная черта – подчиненность к полостям с различными очертаниями. Нередко минерал заполняет интерстиции между пиритом и халькопиритом (рис. 3, в), тем самым образуя своеобразные формы выделения. Средний размер агрегатов составляет 1,45 мкм. Нередко для петцита характерно скопление зерен неправильных и округлых форм размером до 1 мкм в количестве 3–5 единиц.

Теллуровисмутит (Bi_2Te_3) является четвертым по распространенности минералом в рудах, фиксируется в оруденении сплошного и вкрапленного типов. Агрегаты образуют мономинеральные выделения в пирите (рис. 3, г). Формы их при этом достаточно разнообразные: угловатые, слабоизометричные со скошенными углами, овальные, каплевидные. Размерность теллурида висмута варьирует в диапазоне 0,5–7 мкм. Зачастую минерал образует скопления агрегатов в количестве 2–4 единиц.

Раклиджит ($(Bi,Pb)_3Te_4$) – минерал, относящийся к группе алексита, является пятым по распространенности минералом $Te-Bi$ состава. Сосредоточен как в сплошных, так и во вкрапленных рудах с преобладанием к первому типу оруденения. Агрегаты минерала заполняют микропустоты и трещины в пирите, халькопирите и сфалерите, тем самым образуя своеобразные формы выделения: от слабоизометричных до неправильных амебообразных. Практически всегда раклиджит фиксируется в виде россыпи неправильных агрегатов (рис. 3, д) в количестве от 3 до 9 единиц. Размерность зерен варьирует в диапазоне 0,11–5 мкм.

Штютцит (Ag_5Te_3) является шестым по распространенности минералом. Обнаружен в обоих типах руд с преобладанием в сплошных рудах (рис. 3, е). Агрегаты штютцита представлены не-

правильными, слабоокруглыми зернами, заключенными в трещинах и пустотах пирита и халькопирита, в единичных случаях отмечены включения неправильных агрегатов штютцита в кварце на контакте с пиритом. Для минерала не характерно скопление агрегатов, отмечаются лишь обособленные выделения размером от 0,81 до 15,79 мкм.

Калаверит ($AuTe_2$) является седьмым по распространенности минералом теллуру-висмутовой минерализации, распространен как в сплошном типе оруденения, так и во вкрапленном, с преобладанием агрегатов во втором типе. Калаверит в рудах встречается в виде агрегатов овальных, округлых и каплевидных форм. Развивается минерал исключительно по пустотным пространствам в пирите. Практически всегда халькогенид золота образует неравномерные скопления своих агрегатов (рис. 3, ж), спорадически пространственно ассоциирует с гесситом и единично с колорадоитом. Размеры агрегатов варьируют в пределах 0,25–4 мкм с преобладанием более крупных величин.

Колорадоит ($HgTe$), являющийся весьма редким минералом теллурида ртути из группы сфалерита, по распространенности представлен восьмым минералом, отмечающимся исключительно в сплошном типе оруденения. Обычно халькогенид ртути заполняет трещины и пустоты в пирите (рис. 3, з), сфалерите и халькопирите, за счет чего и образует неправильные и угловатые формы выделения. Размерность агрегатов варьирует в диапазоне 2,5–3,5 мкм. Спорадически для минерала выявлены случаи парагенетической ассоциации с калаверитом и петцитом.

Ченгуодаит ($Ag_9FeTe_2S_4$) диагностирован исключительно в сплошных рудах, не превышает 0,5 % от общего объема теллуру-висмутовой минерализации. Минерал развит исключительно в сплошных рудах, образуя неправильные микровключения размером от 2 до 9 мкм. Агрегаты зерен характеризуются неправильными иногда угловатыми формами размером от 2 до 9 мкм. Зачастую ченгуодаит заполняет трещины в халькопирите, образуя уплощенные и неправильные амебообразные агрегаты размером в среднем 5 мкм. Также для минерала характерны неравномерно вкрапленные россыпи (рис. 3, и).

Судя по обилию различных теллуридов в рудах месторождения Абыз, можно полагать, что химический потенциал теллура в гидротермальных растворах был весьма высок.

Аналогично месторождению Абыз, на месторождении Малеевское нами по текстурно-структурным особенностям выделены два типа руд.

Руды сплошного (сливного) типа, являющиеся доминирующим типом на Малеевском месторождении, на 90–95 % сложены сульфидами, где глав-

ными минералами представлены халькопирит CuFeS_2 и пирит FeS_2 , суммарно составляющие до 85 % объема рудной минерализации. Практически всегда халькопирит преобладает, но иногда отмечаются случаи, когда данные минералы находятся практически в равном соотношении. В меньшем объеме диагностированы такие сульфиды, как сфалерит ZnS , галенит PbS , тетраэдрит $(\text{Cu,Fe})_{12}\text{Sb}_4\text{S}_{13}$ и арсенопирит FeAsS , спорадически проявлен молибденит MoS_2 . В качестве нерудных минералов диагностированы кварц SiO_2 , анкерит $\text{Ca}(\text{Fe,Mg,Mn})(\text{CO}_3)_2$ и барит BaSO_4 , в процентном содержании занимающие не более 5 % объема. В процессе изучения сплошных руд в качестве аксессуарных и редких минералов в них были отмечены рутил TiO_2 , самородное золото Au , электрум AuAg , ильменит FeTiO_3 , касситерит SnO_2 , циркон ZrSiO_4 , фаматинит Cu_3SbS_4 , фрейбергит $\text{Ag}_6\text{Cu}_4\text{Fe}_2\text{Sb}_4\text{S}_{13}$, гессит Ag_2Te , самородный висмут Bi , строкаит Bi_3TeS_2 , ксилингоит $\text{Pb}_3\text{Bi}_2\text{S}_6$, изоклейкит $\text{Pb}_{27}(\text{Cu, Fe})_2(\text{Sb, Bi})_{19}\text{S}_{57}$, монацит $(\text{Ce, La, Nd, Th})[\text{PO}_4]$ и рабдофан $(\text{Ce,La})\text{PO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ [22–41].

Вкрапленные руды характеризуются крайне неравномерной густой вкрапленностью рудных агрегатов в нерудной массе. Обычно содержание сульфидов не превышает 45 %, в то время как нерудные минералы могут заполнять до 60 % объема руды.

Пирит со сфалеритом являются доминирующими сульфидными минералами, занимающими до 85 % объема рудной минерализации. Халькопирит, представленный второстепенным сульфидом, является цементом для пирита и сфалерита, нередко заполняет трещинки и пустоты в пирите. Зачастую в ассоциации с халькопиритом и сфалеритом встречается галенит. Спорадически в рудах присутствует тетраэдрит. Нерудные минералы представлены кварцем и анкеритом с преобладанием первого минерала. В качестве редких минералов во вкрапленных рудах выявлены барит BaSO_4 , алтаит PbTe , цервеллеит Ag_4TeS , монацит $(\text{Ce, La, Nd, Th})[\text{PO}_4]$, самородное золото Au , рутил TiO_2 , электрум AuAg , рабдофан $(\text{Ce, La})\text{PO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$, плюмботеллуриит PbTeO_3 , циркон ZrSiO_4 , гессит Ag_2Te .

Оруденение на Малеевском месторождении подверглось эпигенетическим процессам. Руды характеризуются своей сложностью и поликомпонентностью. В ходе исследования установлен обширный ряд редких минералов [21, 22], приуроченных к Te-Bi минерализации: алтаит (PbTe), гессит (Ag_2Te), самородный висмут (Bi), строкаит (Bi_3TeS_2), изоклейкит ($\text{Pb}_{27}(\text{Cu, Fe})_2(\text{Sb, Bi})_{19}\text{S}_{57}$). Впервые в рудах были диагностированы цервеллеит (Ag_4TeS), ксилингоит ($\text{Pb}_3\text{Bi}_2\text{S}_6$) и плюмботеллуриит (PbTeO_3).

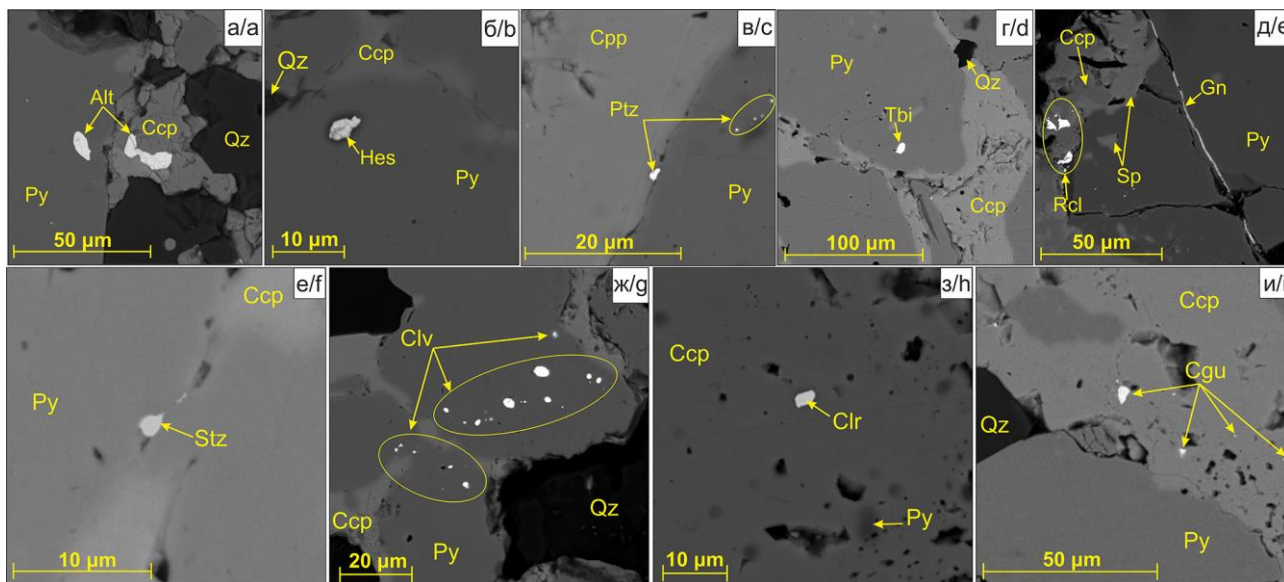


Рис. 3. Снимки со сканирующего электронного микроскопа, демонстрирующие включения алтаита (а), гессита (б), петцита (в), теллуровисмутита (г), раклиджита (д), штютцита (е), калаверита (ж), колорадоита (з), ченгуодаита (и). Условные обозначения: Py – пирит, Qz – кварц, Ccp – халькопирит, Sp – сфалерит, Gn – галенит, Alt – алтаит, Hes – гессит, Clv – калаверит, Tbi – теллуровисмутит, Rcl – раклиджит, Stz – штютцит, Cgu – ченгуодаит, Ptз – петцит, Clr – колорадоит

Fig. 3. Scanning electron microscope images showing inclusions of altaite (a), hessite (b), petzite (c), tellurobismuthite (d), raklijite (e), stutzite (f), calaverite (g), coloradoite (g), chenguodaite (i). Legend: Py – pyrite, Qz – quartz, Ccp – chalcopyrite, Sp – sphalerite, Gn – galena, Alt – altaite, Hes – hessite, Clv – calaverite, Tbi – tellurobismuthite, Rcl – raklijite, Stz – stutzite, Cgu – chenguodaite, Ptз – petzite, Clr – coloradoite

По распространенности минералов теллуро-висмутового состава в рудах наблюдается значительное преобладание изоклейкита ($Pb_{27}(Cu, Fe)_2(Sb, Bi)_{19}S_{57}$), далее в порядке убывания расположены самородный висмут (Bi), гессит ($AgTe_2$), алтаит ($PbTe$), сстрокаит (Bi_3TeS_2), цервеллеит (Ag_4TeS), ксилингоит ($Pb_3Bi_2S_6$) и плюмботеллуриит ($PbTeO_3$). К сплошному типу оруденения приурочено до 64 % всей Te-Bi минерализации, где диагностированы такие минеральные формы, как изоклейкит, самородный висмут, сстрокаит, гессит и ксилингоит. Практически 36 % от общего объема выявленных минеральных агрегатов теллуро-висмутового состава отмечаются во вкрапленном типе оруденения и представлены алтаитом, цервеллеитом, гесситом и плюмботеллуриитом.

Выявленные минералы разделены на три системы (табл. 2), для которых характерно многообразие форм выделения, а также общее сходство – приуроченность к сульфидным минералам.

Как было сказано ранее, самым распространенным минералом является *изоклейкит* ($Pb_{27}(Cu, Fe)_2(Sb, Bi)_{19}S_{57}$), диагностированный в сплошных рудах в виде неправильных агрегатов зачастую с рваными краями. В качестве обособленных выделений размером от 10 до 150 мкм, концентрирующихся в халькопирит-пиритовой массе, минерал наблюдается редко. Обычно данные агрегаты имеют четкие уплощенные контуры за счет стенок пустотных пространств (рис. 4, а). Чаще всего изоклейкит находится в парагенетической ассоциации с фрейбергитом, самородным висмутом или галенитом. Данные формы выделения приурочены обычно к сфалерит-пирит-халькопиритовой массе, а размер их не превышает 80 мкм. Наличие включений (прорастания) самородного висмута в изоклейките свидетельствует о распаде твердого вещества и срастании данных минералов [29].

Таблица 2. Общая характеристика минералов Te-Bi состава на Малеевском месторождении

Table 2. General characteristics of minerals of Te-Bi composition at the Maleevskoe deposit

Минерал Mineral	Рассчитанные усредненные формульные коэффициенты [21] Calculated average formula coefficients [21]	Минерал-хозяин Host mineral	Форма выделения Selection form	Примеси (усредненные значения) Impurities (average values)	Приуроченность к текстурно-структурному типу оруденения Confinement to the textural-structural type of mineralization
Система Ag-Pb-Te, S, O/Ag-Pb-Te, S, O system					
Алтаит Altaite	Pb _{0.97} Te _{1.00}	Халькопирит, сфалерит Chalcopyrite, sphalerite	Неправильная, угловатая Irregular, angular	Ag (3,56 %)	Вкрапленный Interspersed
Плюмботеллурит Plumbotellurite	Pb _{0.99} Te _{1.00} O _{2.82}	Рутил, пирит Rutile, pyrite	Неправильная амёбообразная Irregular, amoeba-shaped	–	Вкрапленный Interspersed
Гессит Hessite	Ag _{1.98} Te _{1.00}	Пирит Pyrite	Неправильная, округлая Irregular, round	Pb (1,28 %)	Вкрапленный, сплошной Interspersed, solid
Цервеллеит Cervellite	Ag _{4.21} Te _{1.06} S _{1.00}	Халькопирит Chalcopyrite	Неправильная, слабоизометричная, вытянутая прямоугольная Irregular, weakly isometric, elongated rectangular	Pb (1,11 %)	Вкрапленный Interspersed
Система Pb-Bi-Te, S/Pb-Bi-Te, S system					
Висмут самородный Native bismuth	Bi	Ксилингоит, изоклейкит Xilingoite, isocleukite	Ламелевидная, неправильная, эмульсионная Lamella-shaped, incorrect, emulsion	–	Сплошной/Solid
Сстрокаит Sztrokayite	Bi _{3.17} Te _{1.12} S _{2.00}	Пирит, халькопирит, анкерит Pyrite, chalcopyrite, ankerite	Проволочковидная, неправильная, угловатая Wire-like, irregular, angular	–	
Ксилингоит Xilingoite	Pb _{3.18} Bi _{2.09} S _{6.00}	Пирит, халькопирит Pyrite, chalcopyrite	Эмульсионная, неправильная Emulsion, irregular	Se (0,17 %)	
Система Pb-Bi-Sb, S, Cu, Fe/System Pb-Bi-Sb, S, Cu, Fe					
Изоклейкит Izoklakeite	(Pb _{27.14} (Cu _{1.54} , Fe _{0.49}) _{2.03} (Sb _{10.99} , Bi _{7.94}) _{18.93} S _{57.00})	Пирит, халькопирит, сфалерит Pyrite, chalcopyrite, sphalerite	Эмульсионная, неправильная Emulsion, irregular	–	Сплошной/Solid

Самородный висмут (Bi) является вторым минералом по распространенности, приурочен исключительно к сплошным рудам. Минерал отмечается в тесном парагенезисе с изоклейкиком (рис. 4, б) и ксилингоитом, образуя в нем ламелевидные и графические включения размером до 5 мкм, интерпретирующие распад твердого раствора. Данные образования (*изоклейкик±самородный висмут* или *ксилингоит±самородный висмут*) наблюдаются в пустотах пирита, арсенопирита и реже халькопирита.

Третьим минералом по распространенности является *гессит* (Ag_2Te), обнаруженный как во вкрапленных, так и в сплошных рудах. Агрегаты характеризуются неправильными, угловатыми формами, сконцентрированными в пустотах и трещинах пирита и халькопирита, а также на контакте данных сульфидов (рис. 4, в). Размер агрегатов в среднем составляет 5–10 мкм. Не раз отмечалась взаимосвязь теллурида серебра с галенитом, характеризующаяся графическими вкраплениями гессита в сульфиде.

Алтаит (PbTe) четвертый минерал по распространенности, диагностированный во вкрапленном типе оруденения. Сосредоточен в трещинах и пу-

стотах пирита (рис. 4, з) и халькопирита в виде неправильных, зачастую угловатых агрегатов размером 0,5–1,5 мкм. Достаточно часто устанавливается парагенетическая связь данного минерала с гесситом (Ag_2Te), что подтверждает их принадлежность к общей минеральной ассоциации.

Сстрокаит (Bi_3TeS_2) является пятым по распространенности минералом Te-Bi состава, диагностированным исключительно в сплошных рудах. Теллурид висмута развивается по пустотам в пирите, халькопирите и спорадически образует на границе кварца с анкеритом скопления включений (рис. 4, д). Более распространенные формы выделения – уплощенные проволочковидные агрегаты, образованные в результате заполнения трещин в пирите и между пиритом и халькопиритом. Данные агрегаты прерывисто заполняют пустоты, за счет чего и непродолжительны по длине – от 4 до 10 мкм. Зерна неправильных и угловатых форм обычно наблюдаются в пустотах и трещинах халькопирита или же на контакте халькопирита с кварцем, при этом зачастую отмечаются неравномерные скопления агрегатов сстрокаита в количестве 2–4 единиц. Размер агрегатов при этом варьирует в пределах 2,3–5,8 мкм.

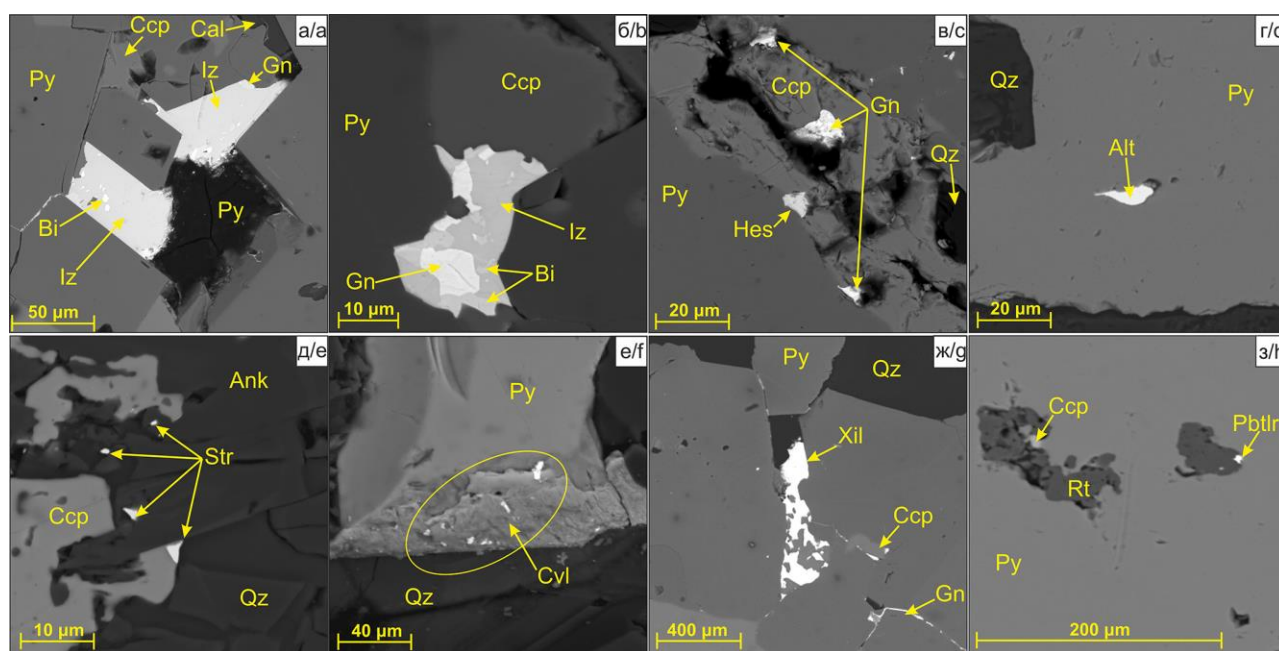


Рис. 4. Снимки со сканирующего электронного микроскопа в обратно рассеянных электронах, демонстрирующие включения в рудах изоклейкика (а), самородного висмута (б), гессита (в), алтаита (г), сстрокаита (д), цервеллеита (е), ксилингоита (ж), плюмботеллурида (з). Условные обозначения: Py – пирит, Qz – кварц, Ank – анкерит, Ccp – халькопирит, Sp – сфалерит, Gn – галенит, Alt – алтаит, Hes – гессит, Cvl – цервеллеит, Xil – ксилингоит, Pbtlr – плюмботеллурид, Iz – изоклейкик, Bi – самородный висмут, Str – сстрокаит, Fb – фрейбергит

Fig. 4. Backscattered electron scanning electron microscope images showing inclusions in ores of izoklakeite (a), native bismuth (b), hessite (c), sztrokayite (d), cervellite (e), xilingoite (g), plumbotellurite (h). Legend: Py – pyrite, Qz – quartz, Ank – ankerite, Ccp – chalcopyrite, Sp – sphalerite, Gn – galena, Alt – altaite, Hes – hessite, Cvl – cervellite, Xil – xilingoite, Pbtlr – plumbotellurite, Iz – izoklakeite, Bi – native bismuth, Str – sztrokayite, Fb – freibergite

Цервеллеит (Ag_4TeS) является шестым по распространенности минералом. Диагностирован в рудах вкрапленного типа, где представлен агрегатами неправильных форм: вытянутыми, слабопрямоугольными, амебообразными, угловатыми. Минерал приурочен к пустотам и трещинам в пирите (рис. 4, е) и халькопирите. При этом зачастую в пирите отмечаются неравномерные скопления агрегатов данного теллурида, а в халькопирите диагностируются лишь обособленные его индивиды. Размер включений варьирует в диапазоне 1,5–3,7 мкм.

Ксилиноит ($Pb_3Bi_2S_6$) является седьмым минералом по распространенности, развит исключительно в рудах сплошного типа. Обычно сульфовисмутид свинца неравномерно заполняет трещины и пустоты в пирите и халькопирите или промежутки между данными сульфидами, образуя тем самым своеобразные неправильные формы выделения с уплощенными и зачастую занозистыми краями (рис. 4, ж). Нередко сульфид пространственно ассоциирует с самородным висмутом и фрайбергитом. Размер агрегатов составляет 35–55 мкм с преобладанием более крупных образований.

Выявленный *плюмботеллури́т* ($PbTeO_3$) представлен в виде псевдоморфоз по алтаиту. Минерал спорадически распространен во вкрапленных рудах, диагностирован в виде агрегатов неправильных форм, приуроченных к таким минералам, как рутил и пирит. В рутиле, заключенном в пирите, минерал концентрируется обычно на его периферии (рис. 4, з) в виде неправильных зерен размером до 2,6 мкм. Второй вариант отложения теллуридного минерала – заполнение пустот и трещин в пирите. В данном случае агрегаты прерывисты и обычно имеют неровные или извилистые края. Размер данных включений составляет 10–20 мкм.

Последовательность минералообразования

С целью расшифровки условий образования теллуро-висмутовой минерализации в колчеданных рудах месторождения Абыз и Малеевское особое внимание было уделено термобарогеохимическому изучению флюидных (газово-жидких) включений (ГЖВ) [22–28] в жильном кварце.

По результатам исследований распределение температур по стадиям минералообразования (табл. 3) на месторождении Абыз следующее:

- менее 110 °С – пострудная стадия (карбонат-кварцевая ассоциация);
- 113–236 °С – рудная стадия золото-серебровисмут-теллуридной ассоциации;
- 245–300 °С – рудная стадия золото-сульфидной ассоциации;
- 305–350 °С – дорудная стадия (березитовая ассоциация).

Дорудная стадия представлена березитовой ассоциацией, по минеральному составу характеризующейся кварц-серицитовыми, серицит-кварцевыми и серицит-анкерит-кварцевыми метасоматитами. В данную стадию активно отлагались такие минералы, как кварц SiO_2 I генерации, анкерит $Ca(Fe,Mg,Mn)(CO_3)_2$ I генерации, серицит $KAl_2[AlSi_3O_{10}](OH)$ и мусковит $KAl_2[AlSi_3O_{10}](OH)$. На завершении стадии формировался пирит FeS_2 I генерации. Температура минералообразования данной стадии находится в пределах 350–305 °С. Давление минералообразующего флюида оценивается в интервале 1150–810 бар.

В пределах *рудной стадии* выделено две ассоциации: золото-сульфидная и золото-серебровисмут-теллуридная.

В золото-сульфидную ассоциацию формировались главные рудные сульфидные минералы: пирит FeS_2 II генерации, халькопирит $CuFeS_2$, сфалерит ZnS , галенит PbS , арсенопирит $FeAsS$. На завершении формирования данной ассоциации в качестве редких и очень редких минералов образовывались лаутит $CuAsS$, электрум $AuAg$ и самородное золото Au . Среди нерудных минералов развивались кварц SiO_2 и анкерит $Ca(Fe,Mg,Mn)(CO_3)_2$ II генераций. Температура минералообразования в данную ассоциацию составляет 300–245 °С. Давление минералообразующего флюида варьирует в диапазоне 790–550 бар.

Во вторую рудную ассоциацию, непосредственно золото-серебровисмут-теллуридную, происходит позднее наложение на ранние сульфиды кюстелита $AgAu$, а также теллуро-висмутовых минералов: гессита Ag_2Te , петцита Ag_3AuTe_2 , калаверита $AuTe_2$, алтаита $PbTe$, раклиджита $(Bi,Pb)_3Te_4$, штютцита Ag_5Te_3 , колорадоита $HgTe$ и теллуrowисмутита Bi_2Te_3 . Среди нерудных минералов отмечаются кварц SiO_2 и анкерит $Ca(Fe,Mg,Mn)(CO_3)_2$ III генераций. Температура минералообразования данной ассоциации варьировалась в диапазоне 236–113 °С, а давление не превышало 550–300 бар.

Завершает процесс минералообразования *пострудная стадия*, представленная карбонат-кварцевой ассоциацией. На протяжении данной стадии происходит кристаллизация кварца SiO_2 IV генерации. В качестве просечек, прожилков и неправильных обособленных агрегатов формируется анкерит $Ca(Fe,Mg,Mn)(CO_3)_2$ IV генерации. Температура минералообразования данной стадии составляет менее 110 °С, а давление не превышает 310 бар.

Высокотемпературный гидротермальный процесс [7, 19, 20, 23–29] на Малеевском месторождении был длительным и проявился в три последовательные стадии (табл. 4): дорудную, рудную и пострудную [29].

Таблица 3. Схема последовательности минералообразования на месторождении Абыз

Table 3. Scheme of the sequence of mineral formation at the Abyz deposit

СТАДИЯ	ДОРУДНАЯ	РУДНАЯ		ПОСТРУДНАЯ
Минеральная ассоциация	Березитовая	Золото-сульфидная	Золото-серебро-висмут-теллуридная	Карбонат-кварцевая
Минералы				
КВАРЦ	I	II	III	IV
АНКЕРИТ	I	II	III	IV
СЕРИЦИТ	I	II	III	IV
МУСКОВИТ	I	II	III	IV
ПИРИТ	I	II	III	IV
АРСЕНОПИРИТ	I	II	III	IV
ХАЛЬКОПИРИТ	I	II	III	IV
СФАЛЕРИТ	I	II	III	IV
ГАЛЕНИТ	I	II	III	IV
ТЕТРАЭДРИТ	I	II	III	IV
БОРНИТ	I	II	III	IV
ПИРРОТИН	I	II	III	IV
КУБАНИТ	I	II	III	IV
ПИРАГИТ	I	II	III	IV
СТЕФАНИТ	I	II	III	IV
ЭЛЕКТРУМ	I	II	III	IV
ЛАУТИТ	I	II	III	IV
ЭНАРГИТ	I	II	III	IV
ТЕННАНТИТ	I	II	III	IV
САМОРОДНОЕ ЗОЛОТО	I	II	III	IV
ПРУСТИТ	I	II	III	IV
МЕДЬ	I	II	III	IV
АЛТАИТ	I	II	III	IV
КЮСТЕЛИТ	I	II	III	IV
ПЕТИЦИТ	I	II	III	IV
КАЛАВЕРИТ	I	II	III	IV
ГЕССИТ	I	II	III	IV
ЧЕНГУОДАНИТ	I	II	III	IV
ШТЮЦИТ	I	II	III	IV
РАКЛИДЖИТ	I	II	III	IV
КОЛОРАДОНИТ	I	II	III	IV
ТЕЛЛУРОВИСМУТИТ	I	II	III	IV
Т °С	350...305	300...245	236...113	110...80
Давление, бар	1150...810	790...550	550...300	310...190
Соленость, мас. % экв. NaCl	7...5,5	8,5...7	10...8	5...2,7
Состав растворов	H ₂ O+NaCl	H ₂ O+NaCl+Na ₂ SO ₄	H ₂ O+NaCl+Na ₂ SO ₄	H ₂ O+NaCl
Тектонические подвижки, интенсивность их проявления	↑	↑	↑	↑
Текстуры	Сплошная, вкрапленная, прожилковая, гнездовая			
Структуры	Идио-алло-гипидиоморфнозернистая, лепидо-гетеро-гранобластовая, коррозионная, эмульсионная, цементная, решетчатая, графическая, метаколлоидная, реликтовая, осколочная, ситовидная, пойкилитовая, структура распада твердых растворов.			

В *дорудную стадию*, представленную березитовой ассоциацией, происходит образование кварц-серицитовых, серицит-кварцевых и анкерит-серицит-кварцевых метасоматитов. На протяжении данной стадии отлагались кварц SiO₂ I генерации, анкерит Ca(Fe,Mg,Mn)(CO₃)₂ I генерации, серицит KAl₁₂[AlSi₃O₁₀](OH). На завершении стадии кристаллизовался пирит FeS₂ I генерации. По результа-

там проведенных термобарогеохимических исследований температурный диапазон минералообразования для данной стадии составляет 360–305 °С. Давление минералообразующего флюида оценивается в интервале 1000–850 бар.

Рудная стадия представлена двумя ассоциациями: золото-сульфидной и серебро-висмут-теллурид-сульфидной.

Таблица 4. Схема последовательности минералообразования на месторождении Малеевское

Table 4. Scheme of the sequence of mineral formation at the Maleevskoe deposit

СТАДИЯ	ДОРУДНАЯ	РУДНАЯ		ПОСТРУДНАЯ
Минеральная ассоциация	Березитовая	Золото-сульфидная	Серебро-висмут-теллурид-сульфидная	Кварц-карбонатная
Минералы				
КВАРЦ	I	II	III	IV
АНКЕРИТ	I	II	III	IV
СЕРИЦИТ	I			
ПИРИТ	I	II	III	
АРСЕНОПИРИТ		I	II	
ХАЛЬКОПИРИТ		I	II	
МОЛИБДЕНИТ		I	II	
СФАЛЕРИТ		I	II	
ГАЛЕНИТ		I	II	
ТЕТРАЭДРИТ		I	II	
МАРКАЗИТ		I	II	
ГУДМУНДИТ		I	II	
ДИГЕНИТ		I	II	
САМОРОДНОЕ ЗОЛОТО		I	II	
ФАМАТИНИТ		I	II	
ФРАЙБЕРГИТ		I	II	
ИЗОКЛЕЙКИТ		I	II	
НИСБИТ		I	II	
КСИЛИНГОИТ		I	II	
ВИСМУТ		I	II	
ССТРОКАИТ		I	II	
ФАЗА $PbAg_2Te$		I	II	
ГЕССИТ		I	II	
АРГЕНИТ		I	II	
ПЛЮМБОТЕЛЛУРИТ		I	II	
АЛТАИТ		I	II	
ЦЕРВЕЛЛЕИТ		I	II	
Т °С	360...305	315...280	280...150	150...80
Давление, бар	1000...850	840...630	615...400	380...205
Соленость, мас. % экв. NaCl	6,6...4,5	12,4...7	16,1...13,5	6...2,1
Состав растворов	$H_2O+NaCl$	$H_2O+MgCl_2+CO_2$	$H_2O+NaCl+MgCl_2+CO_2$	$H_2O+NaCl$
Тектонические подвижки, интенсивность их проявления	↑	↑	↑	↑
Текстуры	Сплошная, вкрапленная, прожилковая, гнездовая			
Структуры	Идио-алло-гипидиоморфнозернистая, лепидо-гетеро-гранобластовая, коррозионная, эмульсионная, цементная, решетчатая, графическая, метаколлоидная, реликтовая, осколочная, ситовидная, пойкилитовая, структура распада твердых растворов.			

В золото-сульфидную ассоциацию формировались главные рудные минералы: пирит FeS_2 II генерации, арсенопирит $FeAsS$, халькопирит $CuFeS_2$, сфалерит ZnS , галенит PbS , тетраэдрит $(Cu,Fe)_{12}Sb_4S_{13}$, молибденит MoS_2 . На завершении стадии в качестве редких и очень редких минералов образовались фаматинит $Cu_3Sb_4S_4$, фрайбергит $Ag_6Cu_4Fe_2Sb_4S_{13}$, самородное золото Au . Среди нерудных минералов развивались кварц SiO_2 и анкерит $Ca(Fe,Mg,Mn)(CO_3)_2$ II генерации. Температура минералообразования в данную ассоциацию составляла 315–280 °С. Давление минералообразующего флюида равнялось 840–630 бар.

Во вторую рудную ассоциацию, непосредственно серебро-висмут-теллурид-сульфидную, кристаллизовались пирит FeS_2 , галенит PbS и халькопирит $CuFeS_2$ III генерации. Далее наблюдается образование минералов теллуру-висмутового состава, представленных строкаитом Bi_3TeS_2 , ксилингоитом $Pb_3Bi_2S_6$, изоклейкитом $(Pb_{27}(Cu,Fe)_2(Sb,Bi)_{19}S_{57})$, висмутом самородным Bi , гесситом Ag_2Te , цервеллеитом Ag_4TeS , алтаитом $PbTe$, плюмботеллуридом $PbTeO_3$. Температура минералообразования данной ассоциации варьирует в диапазоне 280–150 °С, а давление составляет 615–400 бар.

Пострудная стадия, представленная кварц-карбонатной ассоциацией, завершает минералообразование на месторождении. В преобладающем объеме на протяжении всей стадии образовывается кварц IV генерации и в ее завершении анкерит IV генерации. Температура образования пострудной стадии составляет менее 150 °С, а давление варьирует в диапазоне 380–205 бар.

Перспективы развития минерально-сырьевой базы на теллур и висмут в пределах территории Центрального и Восточного Казахстана

Для повышения эффективности отработки колчеданных месторождений на перспективу необходимо взять постоянное восполнение запасов минерального сырья. Выполненные исследования показали четкое различие металлогении колчеданных месторождений, приуроченных к палеоокеаническим и палеоконтинентальным структурам Казахстана. По полученным результатам исследования можно сделать вывод, что ресурсный фонд энсиалических и энсиматических комплексов Казахстана могут дополнить такие элементы-спутники, как полуметалл Те и металл Вi, при этом для энсиалических комплексов отмечается преобладание висмутового элемента, а для энсиматических – теллуrowого (рис. 2, б, в).

Чингиз-Тарбагатайская зона Восточного Казахстана, согласно современным геодинамическим представлениям, является фрагментом раннесреднепалеозойской активной окраины Казахстанского палеоконтинента [42]. В пределах *Чингиз-Тарбагатайской островной дуги* (рис. 1) известно более 20 колчеданных месторождений, вещественный состав которых близок с месторождением Абыз. Прежде всего это месторождения Майкаинской группы (Майкаин Малый, Большой, А, В, а также Красная Горка и Придорожное), расположенные в Баянаульском районе Павлодарской области. Месторождения данного типа состоят из сингенетических, массивных или полумассивных сульфидных линз или пластов. Колчеданные залежи в основном сложены пиритом с подчиненным количеством медных минералов (преимущественно халькопиритом и в меньшем объеме блеклой рудой), галенита, сфалерита, арсенопирита, кварца и барита. Основные компоненты руд: медь, свинец, золото, серебро, сера пиритная, барит. Месторождения имеют низкие-средние показатели Au (0,5–2,9 г/т) и средние-высокие содержания Cu (1,3–5 г/т), что позволяет отнести их по запасам к месторождениям среднего типа [43]. Схожие вещественные параметры рудных тел месторождений Майкаинского типа с месторождением Абыз, а также приуроченность их к одноименной островной энсиматической дуге позволяют спрогнозировать в них возможность попутной добычи теллура из колчеданных руд.

В пределах *Рудно-Алтайской островной дуги* (рис. 1) выделяются колчеданные месторождения Зырянского рудного узла (Греховское, Майское, Зырянское, Богатыревское, Парыгинское, Бухтарминское и др.) аналогичные по вещественному составу с изученным месторождением Малеевское.

Формы рудных тел практически всех месторождений имеют схожие черты строения. Колчеданное оруденение на рудноалтайских месторождениях складывает стратифицированные рудные залежи пластообразной и линзовидной форм среди горизонтов терригенно-осадочных пород. Минеральный состав руд в основном представлен пиритом, халькопиритом, сфалеритом, галенитом, арсенопиритом, молибденитом и кварцем. Основные компоненты руд: медь, свинец, золото, серебро. Помимо данных компонентов присутствуют элементы-примеси, представленные кадмием, ртутью, молибденом, кобальтом, мышьяком, сурьмой, висмутом, теллуrowом, селеном и никелем [2, 5]. Часть месторождений Зырянского рудного района (Долинное, Тишинское, Зырянское) характеризуются повышенными содержаниями Au (0,5–5,0 г/т) и низкими Cu (0,1–0,6 г/т), а другая часть (Греховское, Майское, Бухтарминское и др.) наоборот – средними и высокими содержаниями Cu (1,3–5 %) и низкими-средними Au (0,4–3 %), на основании этого колчеданные месторождения данного узла по запасам относятся к среднему типу [43]. За счет аналогичных вещественных характеристик оруденения Малеевского месторождения с месторождениями Зырянского рудного района, а также приуроченности к одноименным рудному узлу и островной дуге можно прогнозировать в них потенциал попутной добычи висмута из руд.

Полученные результаты позволяют по-новому подойти к стратегии прогнозирования ресурсов минерального сырья колчеданных месторождений-аналогов Абыз и Малеевского, сформированных в подобных геодинамических обстановках на территории Казахстана. Реализация данных прогнозов будет способствовать укреплению минерально-сырьевой базы страны.

Заключение

Для месторождений выполнен сравнительный анализ вещественных комплексов рудных тел, где детально изучены условия формирования и закономерности распределения теллуrowо-висмутовой минерализации. В результате исследований было установлено, что колчеданные руды месторождений Абыз и Малеевское характеризуются довольно сложным минеральным составом, связью минералов между собой и большим набором парагенезисов. Месторождения имеют многостадийное формирование и близкий механизм рудоотложения со сходными физико-химическими условиями образования руд.

В колчеданных рудах месторождений выявлено многообразие теллуру-висмутовой минерализации. Впервые нами в рудах Малеевского месторождения выделены плумботеллурит $PbTeO_3$, цервеллеит Ag_4TeS и ксиллингоит $Pb_3Bi_2S_6$. В свою очередь, в рудах месторождения Абыз диагностированы такие ранее не известные минералы, как калаверит $AuTe_2$, ченгуодаит $Ag_9FeTe_2S_4$, раклиджит $(Bi, Pb)_3Te_4$ и штютцит Ag_5Te_3 .

Взаимоотношения между основными рудными сульфидными минералами и минералами $Te-Bi$ состава в рудах месторождений, а именно развитие их по трещинам, пустотам или на периферии суль-

фидов, указывают на то, что отложение их происходило на завершении рудной стадии. Температурные данные флюидных включений позволяют отнести руды с преобладанием Te (месторождение Абыз) к низкотемпературным, а Bi (месторождение Малеевское) – к мезотермальным.

Комплексное исследование распределения теллуру-висмутовой минерализации в колчеданных рудах также дает возможность оптимизации качества конечного продукта, что, в свою очередь, повышает эффективность и рентабельность производства цветных металлов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гаськов И.В. Особенности развития колчеданных рудно-магматических систем в островодужных обстановках Рудного Алтая и Южного Урала // Литосфера. – 2015. – № 2. – С. 17–39.
2. Мазуров А.К. Металлогеническое районирование Казахстана // Вестник Томского политехнического университета. – 2005. – Т. 308. – № 4. – С. 33–39.
3. Попов В.В. Региональные палеотектонические факторы образования крупных полиметаллических месторождений Рудного Алтая // Геология рудных месторождений. – 1998. – Т. 40. – № 4. – С. 370–378.
4. Дегтярев К.Е., Рязанцев А.В. Кембрийская коллизия дуга-континент в палеозоидах Казахстана // Геотектоника. – 2007. – № 1. – С. 71–96.
5. Большой Алтай (геология и металлогения). В 3 кн. Кн. 2. Металлогения / Г.Н. Щерба, Х.А. Беспяев, Б.А. Дьячков и др. – Алматы: РИО ВАК РК, 2000. – 400 с.
6. Козлов М.С. Условия формирования Рудноалтайской металлогенической провинции // Геология рудных месторождений. – 2015. – Т. 57. – № 4. – С. 299–326.
7. Викентьев И.В. Условия формирования и метаморфизм колчеданных руд. – М.: Научный мир, 2004. – 344 с.
8. Ciobanu C.L., Cook N.J., Spry P.G. Telluride and selenide minerals in gold deposits – how and why? // Mineralogy and Petrology. – 2006. – Vol. 87. – P. 163–169.
9. Древнейшие гранитоиды Чингиз-Тарбагатайской палеостроводужной системы (Восточный Казахстан): обоснование возраста и особенности состава / К.Е. Дегтярев, А.А. Третьяков, М.В. Луцицкая, Н.Л. Вахтина, Е.Б. Сальникова // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту). – 2023. – № 21. – С. 69–71.
10. Нехорошев В.П. Геология Алтая. – М.: Росгеолтехиздат, 1958. – 262 с.
11. К проблеме формирования колчеданно-полиметаллических месторождений Рудного Алтая / Б.А. Дьячков, М.А. Мизерная, А.П. Пяткова, А.Е. Бисатова, А.П. Мирошникова, О.Н. Кузьмина, Н.А. Зиманская, Т.А. Ойцева, З.А. Черненко // Отечественная геология. – 2021. – № 5. – С. 3–16.
12. Geological history of the Great Altai: implications for mineral exploration / B.A. Dyachkov, M.A. Mizernaya, S.V. Khromykh, A.Y. Bissatova, T.A. Oitseva, A.P. Miroshnikova, O.V. Frolova, O.N. Kuzmina, N.A. Zimanovskaya, A.P. Pyatkova, K. Zikirova, O.V. Ageyeva, Y.T. Yeskaliyev // Minerals. – 2022. – Vol. 12. – № 12 (6). – P. 1–23.
13. Дьячков Б.А., Титов Д.В., Сапаргалиев Е.М. Рудные пояса Большого Алтая и оценка их перспектив // Геология рудных месторождений. – 2009. – Т. 51. – № 3. – С. 222–238.
14. Оценка экотоксичности висмута по активности каталазы в зависимости от химического соединения и буферности почв / Л.В. Судьина, С.И. Колесников, Т.В. Минникова, Т.А. Тер-Мисакянц, Е.Н. Неведомая, К.Ш. Казеев // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. – 2021. – № 2 (210). – С. 126–133.
15. Оценка экотоксичности тяжелых металлов, металлоидов и неметаллов, содержащихся в отходах предприятий горной промышленности / Н.А. Естегнеева, С.И. Колесников, Т.В. Минникова, А.Н. Тимошенко // ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 5-1. – С. 73–85.
16. Минералогическая карта Казахстана / Л.А. Мирошниченко, Н.М. Жуков, Х.А. Беспяев, Б.С. Ужкенов, А.К. Мазуров, А.Л. Киселев, Ф.Г. Губайдулин, Т.М. Жаутиков, Э.С. Воцалевский, Д.А. Шлыгин, В.М. Пилифосов, Т.М. Шлыгина // Геология Казахстана. – 2001. – Т. 3–4 (371–372). – С. 73–85.
17. Золото в рудах золото-колчеданного месторождения Абыз (Центральный Казахстан) / А.К. Мазуров, А.Н. Николаева, М.А. Рудмин, Т.Ю. Якич, А.С. Рубан, Ш.Ж. Байболова // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 11. – С. 78–88.
18. Колчеданные месторождения энзиматических островных дуг Казахстана на примере месторождения Абыз / А.К. Мазуров, М.А. Рудмин, Ш.Ж. Байболова, Т.В. Кряжева // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 4. – С. 28–37.
19. Закономерности формирования колчеданно-полиметаллических месторождений на примере месторождения Малеевское / А.П. Пяткова, М.А. Мизерная, А.П. Мирошникова, А.В. Пятков, М.П. Половко // Вестник Восточно-Казахстанского государственного технического университета им. Д. Серикбаева. – 2018. – № 4 (82). – С. 32–38.
20. Юдовская М.А. Минералого-геохимические особенности и условия формирования руд Малеевского месторождения на Рудном Алтае: дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – Усть-Каменогорск, 1984. – 209 с.

21. Mineralogy Database. URL: <https://www.webmineral.com> (дата обращения 17.04.2024).
22. Николаева А.Н. Теллур и висмут в колчеданных месторождениях Казахстана // Актуальные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии: XXXIV Молодежная научная школа-конференция памяти К.О. Кратца и Ф.П. Митрофанова. – СПб, 2–6 октября 2024. – СПб: Свое издательство, 2023. – С. 149–152.
23. Плечов П.Ю. Методы исследования флюидных и расплавных включений. – М.: Изд-во «КДУ», 2014. – 268 с.
24. Кормушин В.А. Метод гомогенизации газовой-жидких включений в минералах / под ред. Н.Г. Сыромятникова. – Алма-Ата: Наука, 1982. – 72 с.
25. Прокофьев В.Ю. Геохимические особенности рудообразующих флюидов гидротермальных месторождений золота различных генетических типов (по данным исследования флюидных включений). – Новосибирск: Наука, 2000. – 186 с.
26. Наумов В.А., Дорофеева В.А., Миронова О.Ф. Основные физико-химические параметры природных минералообразующих флюидов // Геохимия. – 2009. – № 8. – С. 825–851.
27. Manning C.E. Fluids of the lower crust: deep is different // Annual Review of Earth and Planetary Sciences. – 2018. – Vol. 46. – P. 67–97.
28. German C.R., Von Damm K.L. Hydrothermal Processes // Treatise on Geochemistry. – 2003. – Vol. 6–9. – P. 181–222.
29. Николаева А.Н., Мазуров А.К. Теллурио-висмутовая минерализация в рудах Малеевского колчеданного месторождения (Восточный Казахстан) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 5. – С. 233–250. DOI: 10.18799/24131830/2024/5/4209
30. Гусева А.И., Гусев Н.И. Висмутовое оруденение Республики Алтай: типизация и прогнозная оценка // Успехи современного естествознания. – 2013. – № 3. – С. 52–57.
31. In situ trace elements and sulfur isotopes of sulfides in the Dabaiyang Te-Au deposit, Hebei Province, China: Implications for Au remobilization from pyrite / Y. Zhang, S. Zhen, D. Wang, J. Liu, J. Wang, Z. Zha, H. Bai // Ore Geology Reviews. – 2022. – Vol. 140. – P. 1–16.
32. Ahmad M., Solomon M., Walshe J.L. Mineralogical and geochemical studies of the Emperor gold telluride deposit, Fiji // Economic Geology. – 1987. – Vol. 82. – P. 345–370.
33. Au-Ag-Te-Rich melt inclusions in hydrothermal gold-quartz veins, Xiaolinling lead gold district, central China / W. Jian, J.W. Mao, B. Lehmann, N.J. Cook, G.Q. Xie, P. Liu, C. Duan, J. Alles, Z.J. Niu // Economic Geology. – 2021. – Vol. 116 (5). – P. 1239–1248.
34. Bacteria-driven fossil ecosystems as paleoindicators of active continental margins and the role of carbonate sediment-hosted vents in geodynamic reconstructions / L. Bujtor, I. Gyollai, M. Szhabo, I. Kovacs, M. Polgari // Minerals. – 2024. – Vol. 14. – № 125. – P. 1–22.
35. Rabayrol F., Hart C.J.R. Petrogenetic and tectonic controls on magma fertility and the formation of post-subduction porphyry and epithermal mineralization along the late Cenozoic Anatolian Metallogenic Trend, Turkey // Mineralium Deposita. – 2020. – Vol. 56. – P. 279–306.
36. Linear correlations of Gibbs free energy of REE phosphates (monazite, xenotime, and rhabdophane) and internally consistent binary mixing properties / R. Pan, A.P. Gysi, A. Migdisov, L. Gong, P. Lu, C. Zhu // Minerals. – 2024. – Vol. 14. – № 305. – P. 1–18.
37. Reversible thermochromic bismuth iodide enabled by self-adjustment / R. Wen, Y. Wang, X. Ma, Y. Yan, Q. Ma, J. Gao, H. Sun, H. Huang, Z. Gao // Adv. Opt. Mater. – 2023. – 11 (9). DOI: 10.1002/adom.202203148.
38. Warmada I.W., Lehmann B. Polymetallic sulfides and sulfosalts of the Pongkor epithermal gold–silver deposit, West Java, Indonesia // The Canadian Mineralogist. – 2003. – Vol. 41. – P. 185–200.
39. The role of Te(IV) and Bi(III) chloride complexes in hydrothermal mass transfer: An X-ray absorption spectroscopic study / B.E. Etschmann, W. Liu, A. Pring, P.V. Grundler, B. Tooth, S. Borg, D. Testemale, D. Brewé, J. Brugger // Chemical Geology. – 2016. – Vol. 425. – P. 37–51.
40. Speciation of aqueous tellurium (IV) in hydrothermal solutions and vapors, and the role of oxidized tellurium species in Te transport and gold deposition / P.V. Grundler, J. Brugger, B.E. Etschmann, L. Helm, W. Liu, P.G. Spry, Y. Tian, D. Testemale, A. Pring // Geochimica et Cosmochimica Acta. – 2013. – Vol. 120. – P. 298–325.
41. Mineralogy and geochemistry of Cu-Rich ores from the McCreedy east Ni-Cu-PGE deposit (Sudbury, Canada): implications for the behavior of platinum group and chalcophile elements at the end of crystallization of a sulfide liquid / S.A.S. Dare, S.-J. Barnes, H.M. Prichard, P.C. Fisher // Economic Geology. – 2014. – Vol. 109. – P. 343–366.
42. Царева М.Д., Хромых С.В., Котлер П.Д. Петрография и вещественный состав щелочных интрузий Чингиз-Тарбагатайской зоны Восточного Казахстана // Строение литосферы и геодинамика: Материалы XXX Всероссийской молодежной конференции. – Иркутск, 16–21 мая 2023. – Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2023. – С. 297–299.
43. Рафаилович М.С. Крупнотоннажные месторождения золота и цветных металлов Казахстана и соседних регионов Центральной Азии // Известия НАН РК. Серия геологическая. – 2010. – № 6. – С. 12–30.

Информация об авторах

Анастасия Николаевна Николаева, инженер, аспирант отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. nikolaevaanas759@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0003-9058-5048>

Алексей Карпович Мазуров, доктор геолого-минералогических наук, профессор отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. akm@tpu.ru

Поступила в редакцию: 19.05.2024

Поступила после рецензирования: 10.06.2024

Принята к публикации: 14.06.2024

REFERENCES

1. Gaskov I.V. Features of the development of sulfide ore-magmatic systems in island-arc environments of Rudny Altai and Southern Urals. *Lithosphere*, 2015, no. 2, pp. 17–39. (In Russ.)
2. Mazurov A.K. Metallogenic zoning of Kazakhstan. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2005, vol. 308, no. 4, pp. 33–39. (In Russ.)
3. Popov V.V. Regional paleotectonic factors in the formation of large polymetallic deposits of Rudny Altai. *Geology of ore deposits*, 1998, vol. 40, no. 4, pp. 370–378. (In Russ.)
4. Degtyarev K.E., Ryazantsev A.V. Cambrian arc-continent collision in the paleozooids of Kazakhstan. *Geotectonics*, 2007, no. 1, pp. 71–96. (In Russ.)
5. Shcherba G.N., Bespaev Kh.A., Dyachkov B.A. and others. *Great Altai (geology and metallogeny). B. 2. Metallogeny*. Almaty, RIO VAK RK Publ., 2000. 400 p. (In Russ.)
6. Kozlov M.S. Conditions for the formation of the Rudno-Altai metallogenic province. *Geology of ore deposits*, 2015, vol. 57, no. 4, pp. 299–326. (In Russ.)
7. Vikentyev I.V. *Conditions of formation and metamorphism of pyrite ores*. Moscow, Nauchny Mir Publ., 2004. 344 p. (In Russ.)
8. Ciobanu C.L., Cook N.J., Spry P.G. Telluride and selenide minerals in gold deposits – how and why? *Mineralogy and Petrology*, 2006, vol. 87, pp. 163–169.
9. Degtyarev K.E., Tretyakov A.A., Luchitskaya M.V., Vakhtina N.L., Salnikova E.B. The oldest granitoids of the Chingiz-Tarbagatai paleo-island-arc system (Eastern Kazakhstan): justification of age and compositional features. *Geodynamic evolution of the lithosphere of the Central Asian mobile belt (from ocean to continent)*, 2023, no. 21, pp. 69–71. (In Russ.)
10. Nekhoroshev V.P. *Geology of Altai*. Moscow, Rosgeoltekhizdat Publ., 1958. 262 p. (In Russ.)
11. Dyachkov B.A., Mizernaya M.A., Pyatkova A.P., Bisatova A.E., Miroshnikova A.P., Kuzmina O.N., Zimanskaya N.A., Oitseva T.A., Chernenko Z. .A. On the problem of the formation of pyrite-polymetallic deposits of Rudny Altai. *Domestic Geology*, 2021, no. 5, pp. 3–16. (In Russ.)
12. Dyachkov B.A., Mizernaya M.A., Khromykh S.V., Bissatova A.Y., Oitseva T.A., Miroshnikova A.P., Frolova O.V., Kuzmina O.N., Zimanovskaya N.A., Pyatkova A.P., Zikirova K., Ageyeva O.V., Yeskaliyev Y.T. Geological history of the Great Altai: implications for mineral exploration. *Minerals*, 2022, vol. 744, no. 12 (6), pp. 1–23.
13. Dyachkov B.A., Titov D.V., Sapargaliev E.M. Ore belts of the Greater Altai and assessment of their prospects. *Geology of ore deposits*, 2009, vol. 51, no. 3, pp. 222–238. (In Russ.)
14. Sudina L.V., Kolesnikov S.I., Minnikova T.V., Ter-Misakayants T.A., Nevedaya E.N., Kazeev K.Sh. Assessment of the ecotoxicity of bismuth based on catalase activity depending on the chemical compound and soil buffering capacity. *News of universities. North Caucasus region. Natural Sciences*, 2021, no. 2 (210), pp. 126–133. (In Russ.)
15. Estegneeveva N.A., Kolesnikov S.I., Minnikova T.V., Timoshenko A.N. Toxicity estimate of heavy metals, metalloids and nonmetals contained in mineral mining waste. *MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin*, 2023, vol. 5-1, pp. 73–85. (In Russ.)
16. Miroshnichenko L.A., Zhukov N.M., Bespaev Kh.A., Uzhkenov B.S., Mazurov A.K., Kiselev A.L., Gubaidulin F.G., Zhautikov T.M., Votsalevsky E. S.S., Shlygin D.A., Pilifosov V.M., Shlygina T.M. Mineragenic map of Kazakhstan. *Geology of Kazakhstan*, 2001, vol. 3–4 (371–372), pp. 73–85. (In Russ.)
17. Mazurov A.K., Nikolaeva A.N., Rudmin M.A., Yakich T.Yu., Ruban A.S., Baibolova Sh. Zh. Gold in the ores of the Abyz gold-pyrite deposit (Central Kazakhstan). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 11, pp. 78–88. (In Russ.)
18. Mazurov A.K., Rudmin M.A., Baibolova Sh.Zh., Kryazheva T.V. Pyrite deposits of ensimatic island arcs of Kazakhstan on the example of the Abyz deposit. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 4, pp. 28–37. (In Russ.)
19. Pyatkova A.P., Mizernaya M.A., Miroshnikova A.P., Pyatkov A.V., Polovko M.P. Patterns of formation of pyrite-polymetallic deposits using the example of the Maleevskoe deposit. *Bulletin of the East Kazakhstan State Technical University named after D. Serikbaev*, 2018, no. 4 (82), pp. 32–38. (In Russ.)
20. Yudovskaya M.A. *Mineralogical and geochemical features and conditions for the formation of ores of the Maleevsky deposit in Rudny Altai*. Cand. Dis. Ust-Kamenogorsk, 1984. 209 p. (In Russ.)
21. *Mineralogy Database*. Available at: <https://www.webmineral.com> (accessed 14 April 2024).
22. Nikolaeva A.N. Tellurium and bismuth in pyrite deposits of Kazakhstan. *XXXIV Youth Scientific School-Conference in Memory of K.O. Kratz and F.P. Mitrofanov. Current problems of geology, geophysics and geoecology*. St. Petersburg, October 2–6, 2024. St. Petersburg, Own Publ. house, 2023. pp. 149–152. (In Russ.)
23. Plechov P.Yu. *Methods for studying fluid and melt inclusions*. Moscow, KDU Publ., 2014. 268 p. (In Russ.)
24. Kormushin V.A. *Method of homogenization of gas-liquid inclusions in minerals*. Alma-Ata, Nauka Publ., 1982. 72 p. (In Russ.)
25. Prokofiev V.Yu. *Geochemical features of ore-forming fluids of hydrothermal gold deposits of various genetic types (according to the study of fluid inclusions)*. Novosibirsk, Nauka Publ., 2000. 186 p. (In Russ.)
26. Naumov V.A., Dorofeeva V.A., Mironova O.F. Basic physical and chemical parameters of natural mineral-forming fluids. *Geochemistry*, 2009, no. 8, pp. 825–851. (In Russ.)
27. Manning C.E. Fluids of the lower crust: deep is different. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2018, vol. 46, pp. 67–97.
28. German C.R., Von Damm K.L. Hydrothermal Processes. *Treatise on Geochemistry*, 2003, vol. 6–9, pp. 181–222.
29. Nikolaeva A.N., Mazurov A.K. Tellurium-bismuth mineralization in the ores of the Maleevskoe pyrite deposit (Eastern Kazakhstan). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 5, pp. 233–250. (In Russ.) DOI: 10.18799/24131830/2024/5/4209
30. Guseva A.I., Gusev N.I. Bismuth mineralization of the Altai Republic: typification and predictive assessment. *Advances in modern natural science*, 2013, no. 3, pp. 52–57. (In Russ.)

31. Zhang Y., Zhen S., Wang D., Liu J., Wang J., Zha Z., Bai H. In situ trace elements and sulfur isotopes of sulfides in the Dabaiyang Te-Au deposit, Hebei Province, China: Implications for Au remobilization from pyrite. *Ore Geology Reviews*, 2022, vol. 140, pp. 1–16.
32. Ahmad M., Solomon M., Walshe J.L. Mineralogical and geochemical studies of the Emperor gold telluride deposit, Fiji. *Economic Geology*, 1987, vol. 82, pp. 345–370.
33. Jian W., Mao J.W., Lehmann B., Cook N.J., Xie G.Q., Liu P., Duan C., Alles J., Niu Z.J. Au-Ag-Te-Rich melt inclusions in hydrothermal gold-quartz veins, Xiaolinling lead gold district, central China. *Economic Geology*, 2021, vol. 116 (5), pp. 1239–1248.
34. Bujtor L., Gyollai I., Szabo M., Kovacs I., Polgari M. Bacteria-driven fossil ecosystems as paleoindicators of active continental margins and the role of carbonate sediment-hosted vents in geodynamic reconstructions. *Minerals*, 2024, vol. 14, no. 125, pp. 1–22.
35. Rabayrol F., Hart C.J.R. Petrogenetic and tectonic controls on magma fertility and the formation of post-subduction porphyry and epithermal mineralization along the late Cenozoic Anatolian Metallogenic Trend, Turkey. *Mineralium Deposita*, 2020, vol. 56, pp. 279–306.
36. Pan R., Gysi A.P., Migdisov A., Gong L., Lu P., Zhu C. Linear correlations of Gibbs free energy of REE phosphates (monazite, xenotime, and rhabdophane) and internally consistent binary mixing properties. *Minerals*, 2024, vol. 14, 305, pp. 1–18.
37. Wen R., Wang Y., Ma X., Yan Y., Ma Q., Gao J., Sun H., Huang H., Gao Z. Reversible Thermochromic Bismuth Iodide Enabled by Self-Adjustment. *Adv. Opt. Mater.*, 2023, vol. 11 (9). DOI: 10.1002/adom.202203148.
38. Warmada I.W., Lehmann B. Polymetallic sulfides and sulfosalts of the Pongkor epithermal gold–silver deposit, West Java, Indonesia. *The Canadian Mineralogist*, 2003, vol. 41, pp. 185–200.
39. Etschmann B.E., Liu W., Pring A., Grundler P.V., Tooth B., Borg S., Testemale D., Brewe D., Brugger J. The role of Te (IV) and Bi (III) chloride complexes in hydrothermal mass transfer: An X-ray absorption spectroscopic study. *Chemical Geology*, 2016, vol. 425, pp. 37–51.
40. Grundler P.V., Brugger J., Etschmann B.E., Helm L., Liu W., Spry P.G., Tian Y., Testemale D., Pring A. Speciation of aqueous tellurium (IV) in hydrothermal solutions and vapors, and the role of oxidized tellurium species in Te transport and gold deposition. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2013, vol. 120, pp. 298–325.
41. Dare S.A.S., Barnes S.-J., Prichard H. M., Fisher P.C. Mineralogy and geochemistry of Cu-Rich ores from the McCreedy east Ni-Cu-PGE deposit (Sudbury, Canada): implications for the behavior of platinum group and chalcophile elements at the end of crystallization of a sulfide liquid. *Economic Geology*, 2014, vol. 109, pp. 343–366.
42. Tsareva M.D., Khromykh S.V., Kotler P.D. Petrography and material composition of alkaline intrusions of the Chingiz-Tarbagatai zone of Eastern Kazakhstan. *Structure of the lithosphere and geodynamics. Materials of the XXX All-Russian Youth Conference*. Irkutsk, May 16–21, 2023. Irkutsk, Institute of the Earth's Crust SB RAS Publ., 2023. pp. 297–299. (In Russ.)
43. Rafailovich M.S. Large-tonnage deposits of gold and non-ferrous metals in Kazakhstan and neighboring regions of Central Asia. *Izvestiya NAS RK. Geological series*, 2010, no. 6, pp. 12–30. (In Russ.)

Information about the authors

Anastasia N. Nikolaeva, Engineer, Postgraduate Student, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. nikolaevaanastas759@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0003-9058-5048>

Alexey K. Mazurov, Dr. Sc., Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. akm@tpu.ru

Received: 19.05.2024

Revised: 10.06.2024

Accepted: 14.06.2024

УДК 622.276.6
DOI: 10.18799/24131830/2024/8/4427
Шифр специальности ВАК: 2.8.4

Методика определения оптимального объема реагента для кислотных обработок карбонатных коллекторов на основе метода кривой восстановления давления

А.В. Юрин^{1✉}, Е.П. Рябоконт²

¹ ООО «ЛУКОЙЛ-ПЕРМЬ», Россия, г. Пермь

² Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Россия, г. Пермь

✉Alexandr.Yurin@lp.lukoil.com

Аннотация. *Актуальность* исследования обусловлена необходимостью повышения эффективности кислотных обработок карбонатных коллекторов. Зачастую в дизайне обработок не учитываются реальные условия работы добывающих скважин, что ведет к завышению или занижению требуемого объема реагента. *Цель:* предложить методику определения оптимального количества реагента для проведения кислотных обработок карбонатных коллекторов с целью восстановления проницаемости горной породы околоскважинной зоны с учетом реальных условий работы скважины, позволяющую рационализировать использование ресурсов недропользователя. *Объекты:* добывающие нефтяные скважины, эксплуатирующие залежи нефти в карбонатных отложениях Пермского края, а также результаты гидродинамических исследований, проведенные на данных скважинах. *Методы:* теоретическое обоснование возможности определения зоны ухудшенной проницаемости вокруг скважины по графику кривой восстановления давления, графическая обработка диагностических графиков кривой восстановления давления, математический расчет технологических показателей на основе данных гидродинамических исследований скважин, интегрирование объемов притока, анализ технологических данных и условий применимости методики. *Результаты.* Разработана методика определения оптимального объема реагента для кислотных обработок карбонатных коллекторов на основе метода кривой восстановления давления. Выполнен расчет оптимального объема реагента для 21 добывающей скважины. На примере 13 скважин определен коэффициент полезного действия закаченного объема реагента и продемонстрирован завышенный объем закаченного в пласт реагента. Выполнена оценка затрат недропользователя с учетом перерасхода реагента. Определены факторы, влияющие на успешность применения методики в зависимости от условий работы скважин. Выявлены критерии, при которых проведение кислотной обработки нецелесообразно.

Ключевые слова: проницаемость, ухудшение фильтрационных свойств, блокирование порового пространства, кислотная обработка пласта, объем реагента, кривая восстановления давления

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00447, <https://rscf.ru/project/22-19-00447/>.

Для цитирования: Юрин А.В., Рябоконт Е.П. Методика определения оптимального объема реагента для кислотных обработок карбонатных коллекторов на основе метода кривой восстановления давления // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 8. – С. 215–226. DOI: 10.18799/24131830/2024/8/4427

UDC 622.276.6

DOI: 10.18799/24131830/2024/8/4427

Method for determining reagent optimum volume for acid treatments of carbonate reservoirs based on a pressure build-up curve method

A.V. Yurin^{1✉}, E.P. Riabokon²

¹ LUKOIL-PERM LLC, Perm, Russian Federation

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

✉ Alexandr.Yurin@lp.lukoil.com

Abstract. Relevance. The need to increase the efficiency of acid treatments of carbonate reservoirs. Often, the design of treatments does not take into account the actual operating conditions of production wells, which leads to an overestimation or underestimation of the required volume of the reagent. **Aim.** To propose a method for determining the optimal amount of reagent for carrying out acid treatments of carbonate reservoirs in order to restore the permeability of the rock in the near-well zone, taking into account the actual operating conditions of the well, which allows rationalizing the use of subsoil user resources. **Objects.** Producing oil wells exploiting oil deposits in carbonate deposits of the Perm region, as well as the results of hydrodynamic studies carried out on these wells. **Methods.** Theoretical substantiation of the possibility of determining the zone of deteriorated permeability around the well using the pressure recovery curve graph, graphical processing of diagnostic graphs of the pressure recovery curve, mathematical calculation of technological indicators based on hydrodynamic testing data of wells, integration of inflow volumes, analysis of technological data and conditions of applicability of the methodology. **Results.** The authors have developed the methodology for determining the optimal volume of reagent for acid treatments of carbonate reservoirs based on the pressure recovery curve method. The optimal volume of reagent for 21 production wells was calculated. Using the example of 13 wells, the efficiency of the injected volume of reagent was determined and an overestimated volume of reagent injected into the formation was demonstrated. The authors assessed the subsoil user's costs taking into account the excess consumption of the reagent. The factors influencing the success of the method application depending on the operating conditions of the wells were identified. Criteria inappropriateness of acid treatment were identified.

Keywords: permeability, deterioration of filtration properties, blockage of pore space, formation acid treatment, reagent volume, pressure build-up curve

Acknowledgements: The study was supported by the Russian Science Foundation grant no. 22-19-00447, <https://rscf.ru/project/22-19-00447/>.

For citation: Yurin A.V., Riabokon E.P. Method for determining reagent optimum volume for acid treatments of carbonate reservoirs based on a pressure build-up curve method. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 8, pp. 215–226. DOI: 10.18799/24131830/2024/8/4427

Введение

При работе добывающих скважин происходит загрязнение горной породы в околоскважинной зоне пласта из-за проникновения в поровое пространство технологических жидкостей из скважины [1] или выноса частиц из пласта [2, 3], что ведет к снижению проницаемости горной породы и продуктивности скважины. Для восстановления продуктивности добывающих скважин широкое распространение получили кислотные обработки пласта. Согласно [4], основными вопросами при проектировании кислотных обработок являются: эффективное управление направлением флюида, ограничение червоточины и чрезмерной утечки жидкости, применение обработки при высоких и низких температурах, а также подбор концентрации кислоты. В целом считается, что с увеличением

объема закаченной кислоты в пласт происходит снижение скин-эффекта [5] и увеличение проницаемости горной породы околоскважинной зоны пласта [6]. Введено понятие пороговой проницаемости (cutoff permeability) [7], выше которой кислотная обработка матрицы более эффективна, чем кислотный гидроразрыв, и выполнено моделирование множества сценариев, демонстрирующих, что с увеличением объема кислоты эффективность кислотной обработки повышается. Одним из критически важных аспектов в дизайне кислотных обработок является анализ на совместимость кислотного состава с пластовыми флюидами [8]. В работе [9] на основе трех моделей кислотных жидкостей (Dowell, McLeod, and Kalfayan) выполнен анализ совместимости составов с горной породой и определен требуемый объем кислотного состава.

Современные подходы к дизайну кислотных обработок включают использование программных продуктов (например, [10]), машинного обучения [11] и генетического программирования [12]. Входными параметрами для расчета в лабораторных условиях являются: пористость, проницаемость, размеры образца керна, насыщенность флюидом, вязкость, плотность, сжимаемость нефти, скорость закачки, температура, концентрация кислоты, молекулярная диффузия кислоты и скорость реакции, перепад давления, скорость потока [13]. Оценить эффективность кислотной обработки также можно по результатам гидродинамических исследований (ГДИ) скважин, проведенных перед обработкой пласта и после нее, сравнив значения скин-эффекта [14] и подставив в уравнение продуктивности [15].

Для успешного проведения кислотной обработки пласта помимо данных лабораторных исследований и истории работы скважины [16] дизайн обработки должен учитывать множество факторов, включая расход, концентрацию, температуру и давление в обрабатываемом пласте, а также объем реагента [17]. Среди прочих факторов на выбор требуемого объема реагента в пластовых условиях влияет расположение (глубина) загрязненного участка пласта относительно скважины, которое должно учитываться в дизайне кислотной обработки [18]. Для оценки объема реагента многие инженеры и исследователи используют идеализированный подход, когда объем реагента определяется исходя из размеров призабойной зоны пласта (ПЗП). Однако при проведении расчетов с таким подходом при выборе объема реагента не учитывается расстояние от скважины в пласте, на котором расположена зона ухудшенной проницаемости. Негативными последствиями этого могут являться как недостаточный объем реагента, что ведет к потере временных и финансовых ресурсов, так и повышенный расход реагента, что ведет к изменениям механических характеристик горных пород, в частности к снижению модуля Юнга [19]. В обоих случаях выбранный неоптимальный объем реагента снижает эффективность кислотной обработки.

Помимо указанных подходов, существуют и другие, описанные далее. На основе математического моделирования автор [20] разработал диаграммы для определения требуемого объема кислоты для обработки трещиноватых карбонатных коллекторов и предложил рассчитывать глубину зоны ухудшенной проницаемости по экспоненциальному закону $r_d = r_w \exp(S/(k_d/k_d - 1))$ на основании знания только лишь скин-эффекта и проницаемостей двух зон. В работе [21] предложено определять оптимальный объем раствора соляной кислоты на основе кривой кислотной реакции (acid response curve),

даны соотношения для определения итогового коэффициента проницаемости, расчет которого основан на текущем и прогнозируемом коэффициенте продуктивности, однако не представлено соотношений для определения требуемого объема кислотного состава для условий пласта. Для определения оптимального объема реагента при соляно-кислотной обработке (СКО) в [22] предложено использовать формулу $V_{opt} = \ln(a)/(-b)$, в которой a характеризует долю оставшегося скин-эффекта по отношению к общему скин-эффекту, b – это характеристика кривой, влияющая на соответствие расчетных и фактических значений. Аналогичный подход отображения скин-эффекта в реальном времени для оценки эффективности проведения кислотной обработки был предложен в [23]. Однако технология определения оптимального объема кислотного состава в режиме реального времени [24] не получила широкого распространения, в результате чего в пласт продолжает закачиваться заранее приготовленный объем кислотного состава.

Учитывая расхожие подходы к оценке требуемого количества реагента для кислотных обработок пласта, в дополнении к указанным в [4] направлениям можно выделить еще один не менее актуальный вопрос, связанный с дизайном кислотных обработок – определение оптимального объема кислотного состава.

Помимо указанных выше методик для расчета оптимального объема химического реагента широкое распространение получили методики, основанные на числах Дамкелера (например, [25, 26]) и Пекле. Число Дамкеллера используется для определения количества кислоты из расчета толщины пласта. Особенностью и одновременно недостатком теорий на основе использования числа Дамкеллера по выбору объема кислотного состава является то, что они все закладывают в расчет идеальные условия и не учитывают явления, которые наблюдаются в пласте при эксплуатации скважины. Если, к примеру, на пласте небольшой толщины проводилась кислотная обработка (и не одна), то некоторый объем породы уже был растворен кислотным составом. Это означает, что при расчете объема кислотного состава для следующей кислотной обработки по методикам на основе чисел Дамкеллера требуемый объем реагента будет завышен.

Идея настоящей работы заключается в определении объема реагента на основе результатов ГДИ до кислотной обработки, которые отражают актуальные условия эксплуатации скважины. В работе предлагается определять оптимальный объем кислотного состава по кривой восстановления давления (уровня) (КВД/КВУ). Статья организована следующим образом. Выше приведена методика использования КВД для оценки размеров зоны ухуд-

шенной проницаемости. Ранее на основе результатов промысловых исследований приведены результаты тестирования методики и обсуждение, за которыми следует заключение.

Описание методики

Кривая восстановления давления как инструмент для оценки объема зоны ухудшенной проницаемости

Дизайн кислотных обработок должен предполагать предварительную оценку загрязненности околоскважинной зоны пласта и расстояние от скважины, на котором расположена область ухудшенной проницаемости. Наличие зоны вблизи скважины с ухудшенной проницаемостью горной породы можно определить по форме графика КВД. Если проницаемость горной породы в околоскважинной зоне не ухудшена (соответствует проницаемости пласта), то давление в скважине восстанавливается с приблизительно равной скоростью, что проявляется в плавном росте кривой зависимости забойного давления P_z от времени с начала исследования t (с момента остановки скважины). Этому явлению соответствует беспрепятственное (за исключением естественных фильтрационных сопротивлений) наполнение флюидом околоскважинной зоны и поступление флюида в скважину (рис. 1).

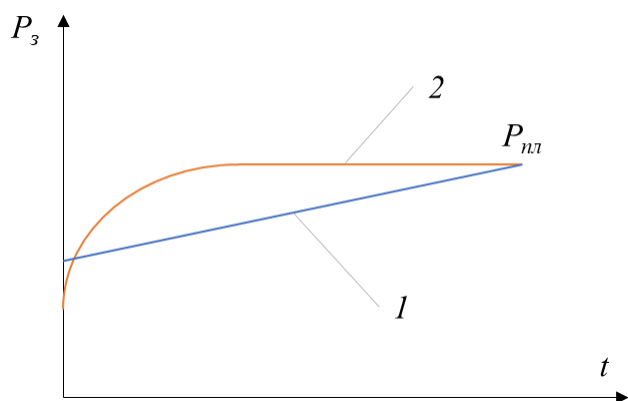


Рис. 1. График изменения забойного давления при регистрации КВД/КВУ в скважине с околоскважинной зоной где: (1) проницаемость не ухудшена; (2) проницаемость ухудшена

Fig. 1. Graph of changes in bottomhole pressure when recording pressure build-up curve in a well with a near-wellbore zone where: (1) permeability is not deteriorated; (2) permeability is deteriorated

В случае, если проницаемость околоскважинной зоны ухудшена, блокирующий поровое пространство материал (кольматант, песок или парафины) играет роль штуцера и ограничивает поступление флюида из пласта в околоскважинную зону, в ре-

зультате чего давление в околоскважинной зоне становится значительно ниже, чем сразу за её границей. В таких условиях, после остановки скважины на начальном этапе исследования происходит интенсивный рост забойного давления, связанного с тем, что значительное подпирающее давление флюида на границе зоны ухудшенной проницаемости быстро наполняет объем околоскважинной зоны и поступает в скважину. При этом чем меньше объем околоскважинной зоны с ухудшенной проницаемостью (т. е. зона частично заблокированного порового пространства горной породы расположена ближе к стволу скважины), тем быстрее на начальном этапе будет увеличиваться забойное давление (рис. 1). Данное утверждение справедливо и в обратную сторону: с увеличением объема околоскважинной зоны (т. е. зона частично заблокированного порового пространства расположена дальше от скважины) забойное давление восстанавливается медленнее. Примеры реальных КВД со скважин с отсутствием зоны ухудшенной проницаемости и в присутствии зоны ухудшенной проницаемости горной породы околоскважинной зоны пласта приведены на рис. 2, а, б, соответственно.

В случае отсутствия зоны ухудшенной проницаемости (рис. 2, а) забойное давление растет практически с одинаковой скоростью, на графике при этом выделяется несколько прямолинейных участков (этапов). Первый прямолинейный участок фиксируется на протяжении полутора месяцев с начала исследования. Этот этап характеризуется равномерным беспрепятственным поступлением жидкости в скважину, после чего давление перестает увеличиваться с тем же темпом ввиду ограничения (штуцера), вызванного, по всей видимости, областью ухудшенной проницаемости, расположенной на достаточно удаленном расстоянии от скважины. После того, как 29.05.2023 давление в двух областях стабилизировалось, рост забойного давления вновь продолжается (этап 2), но уже с меньшим темпом. В дальнейшем в пласте вновь возникает некоторое сопротивление, после которого на этапе 3 давление снова растет с постоянным темпом. Временные периоды нелинейного роста забойного давления между выделенными этапами соответствуют перераспределению давления между зонами в пласте. На рис. 2, б, в сравнении с рис. 2, а, наблюдается высокий темп роста забойного давления в течение первых трех дней (этап 1) с начала исследования. Этому явлению соответствует очень небольшая зона ухудшенной проницаемости вокруг скважины, за которой расположена зона с высоким давлением, в результате чего забойное давление уже в течение недели (этап 2) достигает значения пластового давления.

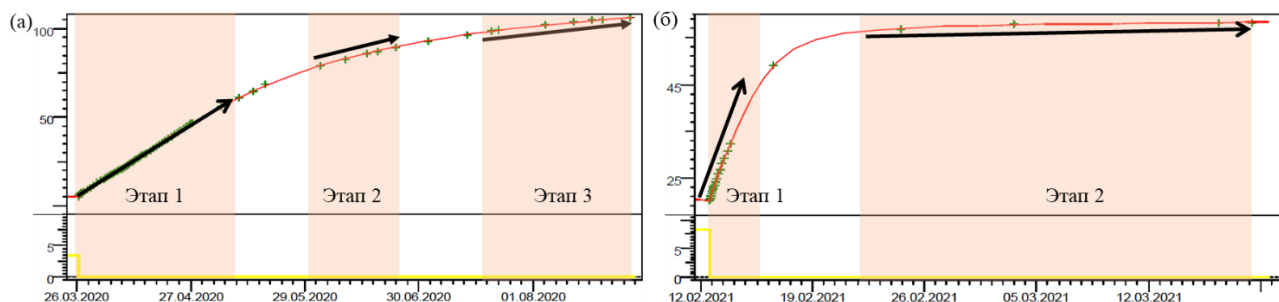


Рис. 2. Графики изменения забойного давления по времени при регистрации КВУ на скважинах: (а) с отсутствием зоны с ухудшенной проницаемостью: P_z восстанавливается плавно, выделяются интервалы линейного роста, отмеченные стрелками; (б) с ухудшенной проницаемостью горной породы околоскважинной зоны пласта – P_z восстанавливается интенсивно вначале и медленно после перегиба. Стрелками показаны интервалы линейного роста забойного давления

Fig. 2. Graphs of changes in bottomhole pressure over time when recording water pressure in wells: (a) without a zone with deteriorated permeability: P_z is restored smoothly, intervals of linear growth are identified, marked by arrows; (b) with deteriorated permeability of the rock near the wellbore zone of the formation – P_z is restored intensively at the beginning and slowly after the inflection. The arrows indicate the intervals of linear growth of bottomhole pressure

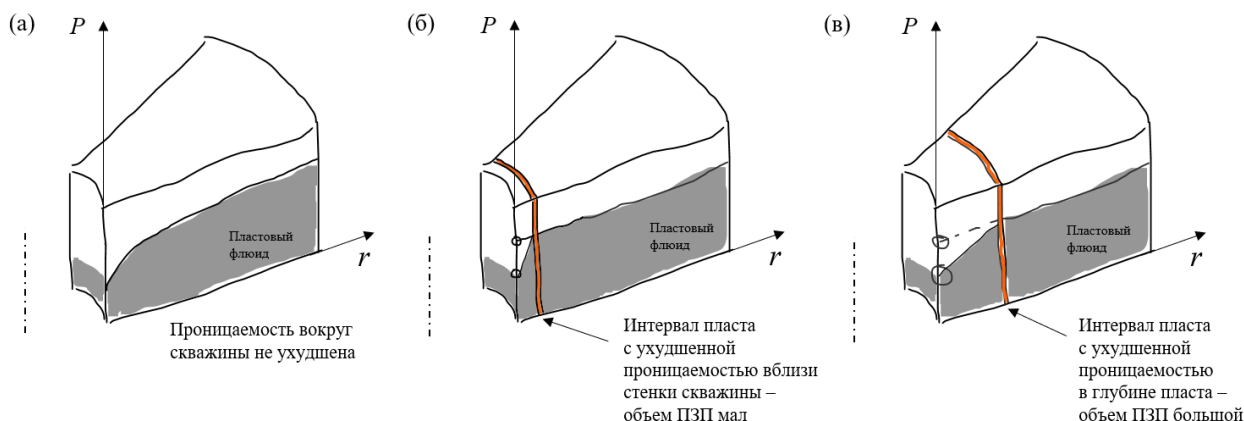


Рис. 3. Схематичное изображение распределения давления в пласте в момент остановки скважины для исследования, когда: (а) зона ухудшенной проницаемости отсутствует; (б) зона ухудшенной проницаемости горной породы расположена у стенки скважины; (в) зона ухудшенной проницаемости горной породы расположена в глубине пласта

Fig. 3. Schematic representation of the pressure distribution in the formation at the time of stopping the well for research, when: (a) there is no zone of deteriorated permeability; (b) a zone of deteriorated rock permeability is located near the well wall; (c) a zone of deteriorated rock permeability is located deep in the formation

Схематично влияние расположения зоны ухудшенной проницаемости в пласте на форму кривой КВД показано на рис. 3. Если проницаемость околоскважинной зоны не ухудшена, то в начальный момент времени распределение давления соответствует рис. 3, а. Если блокирующий материал расположен вблизи ствола скважины, то распределение давления соответствует рис. 3, б. Если блокирующий поровое пространство материал проник глубоко в пласт, то распределение давления будет соответствовать рис. 3, в.

Пример использования данных КВД по предлагаемой методике

Приведем пример работы с данными ГДИ по одной из нефтяных залежей в башкирских отложе-

ниях C_2b (средний карбон) на юге Пермского края. На скважине в ноябре 2020 г. были проведены исследования до обработки (рис. 4, а, б) и в марте 2023 г. после обработки (рис. 4, в, г).

Предварительный анализ результатов ГДИ после кислотной обработки позволяет отметить следующее:

- 1) в сравнении с результатами ГДИ до обработки график изменения забойного давления (рис. 4, в) демонстрирует выполаживание кривой, означая что в целом кислотная обработка прошла успешно (наличие перегиба на рис. 4, в, вероятно, связано с возникновением новой колматации ПЗП, образованной уже после обработки скважины);

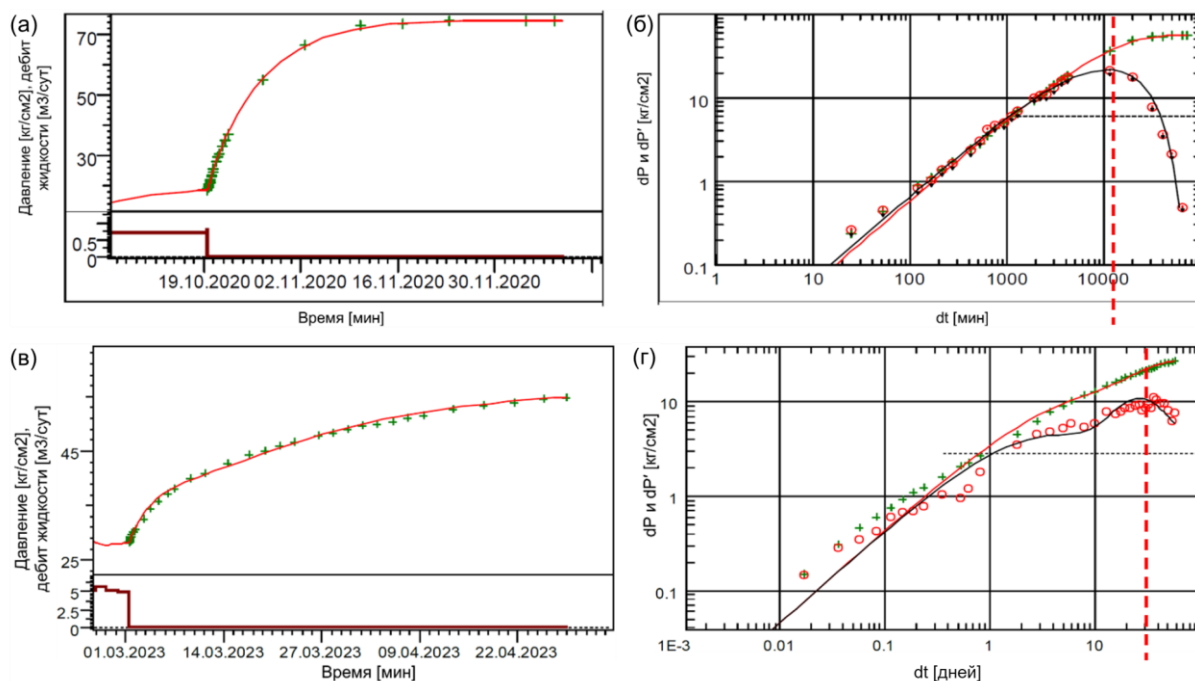


Рис. 4. Результаты ГДИ до кислотной обработки: (а) кривая восстановления забойного давления P_3 во времени; (б) диагностический график КВУ и после кислотной обработки: (в) кривая восстановления забойного давления P_3 во времени; (г) диагностический график КВУ

Fig. 4. Results of hydrodynamic studies of the well before acid treatment: (a) recovery curve of bottomhole pressure P_3 over time; (b) diagnostic graph of water pressure control and after acid treatment: (c) recovery curve of bottomhole pressure P_3 over time; (d) diagnostic graph of pressure build-up curve

- 2) перегиб производной после кислотной обработки наблюдается на 30-й день, в то время как по данным до обработки перегиб выделялся только после 10 дней. Рис. 4, г демонстрирует, что после обработки накопление жидкости в ПЗП происходит быстрее, чем до обработки. Вероятной интерпретацией при сравнении данных рис. 4, г, б является снятие скин-эффекта вокруг скважины в результате обработки;
- 3) после обработки отмечается снижение пластового давления, связанное с увеличением отбора жидкости в районе скважины.

Выполним расчет оптимального значения объема кислотной обработки. Для этого нам понадобится КВД (рис. 4, а) и диагностический график (рис. 4, б), снятые перед кислотной обработкой на скважине. На диагностическом графике перегиб кривой производной давления во времени выделяется в районе 14 тыс. мин (или 9,7 дней), что соответствует окончанию наполнения ПЗП флюидом.

Идея заключается в определении объема жидкости, поступившей в ПЗП до момента перегиба производной на рис. 4, а, б. Для этого нам потребуется просуммировать объемы, поступившие в пласт к этому времени. Из рис. 4, а, б, определяется значение забойного давления, при котором работает скважина до остановки, а также значение текущего пластового давления, что дает понимание полной депрессии на пласт (табл. 1).

Таблица 1. Значения параметров исследования скважины

Table 1. Values of well test parameters

Параметр/Parameter			
Депрессия на пласт (полная) Pressure drop (full)	Дебит скважины до остановки Well rate before shutdown	Коэффициент продуктивности Productivity index	Время перегиба графика производной Inflection time of the derivative graph
5,48 МПа MPa	0,8 м³/сут m³/day	0,146 м³/сут/МПа m³/day/MPa	14000 мин min

Далее с использованием коэффициента продуктивности выполняется расчет дебита скважины в м³/сут (рис. 5, а). Чтобы проинтегрировать кривую на рис. 5, а выполнен пересчет ее значений в м³/мин (рис. 5, б).

Затем ограничиваем значения абсциссы моментом перегиба производной и аппроксимируем данные. В результате получаем аппроксимирующую функцию дебита, которую нужно проинтегрировать (подробности интегрирования в следующем подразделе). Итогом интегрирования является значение объема жидкости, поступившей из пласта и наполнившей ПЗП. В случае рассматриваемой скважины объем жидкости, поступившей в ПЗП, составил 4,3 м³.

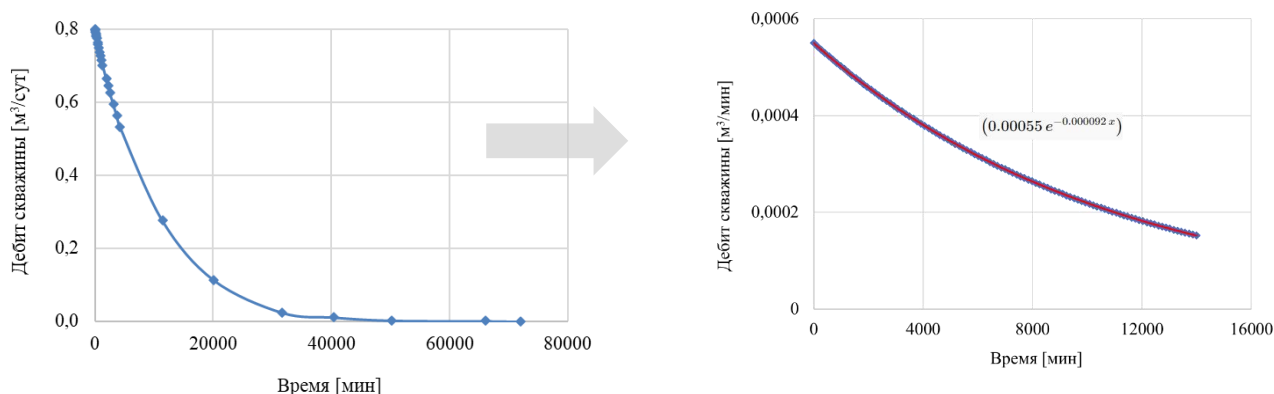


Рис. 5. Графики дебита скважины: (а) на протяжении всего исследования в координатах $\text{м}^3/\text{сут}/\text{мин}$; (б) до перегиба производной в координатах $\text{м}^3/\text{мин}/\text{мин}$

Fig. 5. Well flow charts: (a) throughout the study in coordinates $\text{m}^3/\text{day}/\text{min}$; (b) before the inflection of the derivative in the coordinates $\text{m}^3/\text{min}/\text{min}$

Однако объем реагента для кислотной обработки был выбран равным 30 м^3 , что почти в 6 раз больше расчетного значения. Данный пример свидетельствует о дизайне кислотной обработки с неоптимальным объемом реагента, в результате чего трудовые и материальные ресурсы были израсходованы неэффективно.

Алгоритм методики

Методика определения по данным ГДИ добывающей скважины требуемого объема химического реагента для обработки ПЗП включает шесть этапов:

1. На основе табличных значений графика изменения забойного давления во времени выполняется оценка технологических показателей работы скважины, таких как: депрессия на пласт, дебит скважины и коэффициент продуктивности. Расчет везде выполняется в одинаковых единицах времени.
2. По графику изменения забойного давления во времени выявляется перегиб, соответствующий границе зоны ухудшенной проницаемости.
3. По диагностическому графику КВД определяется точка (момент времени), в которой наблюдается перегиб производной, соответствующий моменту времени, когда волна возмущения дошла от скважины до интервала пласта ухудшенной проницаемости, что соответствует замедлению темпа роста забойного давления.
4. Строится график изменения дебита с момента начала исследования до момента перегиба производной и определяется функция, аппроксимирующая данные исследования.
5. Интегрируется объем жидкости, поступившей в околоскважинное пространство до момента перегиба производной. В качестве примера использован метод трапеций. В пределах интегрирования устанавливается временной шаг h и количество шагов интегрирования i (чем меньше временной шаг и больше шагов интегрирования,

тем точнее значение интеграла и меньше погрешность). Далее по полученной аппроксимирующей функции на каждом новом шаге рассчитывается объем жидкости $f(x_i)$ для каждого момента времени x_i , а также сумма объемов предыдущего шага и текущего $f(x_{i-1}) + f(x_i)$. Суммируются значения $f(x_{i-1}) + f(x_i)$ и по формуле $S \approx \frac{h}{2} \sum_{i=1}^n f(x_{i-1}) + f(x_i)$ рассчитывается интегральное значение объема пластового флюида, поступившего в околоскважинное пространство. Определяется погрешность.

6. Исходя из объема жидкости, поступившей в околоскважинное пространство до момента перегиба производной, с использованием параметров пласта (толщина, пористость) определяется расстояние r , на котором в околоскважинном пространстве расположен интервал низкой проницаемости. До этого расстояния и немного дальше в пласт необходимо закачать кислотный раствор, чтобы разблокировать (убрать штуцер) поровое пространство.

Блок-схема методики приведена на рис. 6.

Результаты и обсуждение

Выполнен анализ результатов ГДИ для 26 добывающих скважин, эксплуатирующих залежи нефти в карбонатных коллекторах, на которых проводилась СКО. Скважины выбраны в соответствии с тем, что по ним имеются, во-первых, относительно свежие данные по ОПЗ – за 2021–2022 гг., во-вторых, результаты ГДИ до обработки и после обработки, чтобы можно было сравнить как изменилась форма кривых после СКО (соответственно для большего рассматриваемого периода скважин для анализа будет больше; помимо этого, скважин, по которым есть ГДИ только до обработки, также большое количество, но анализ по тем скважинам является задачей последующих исследований).

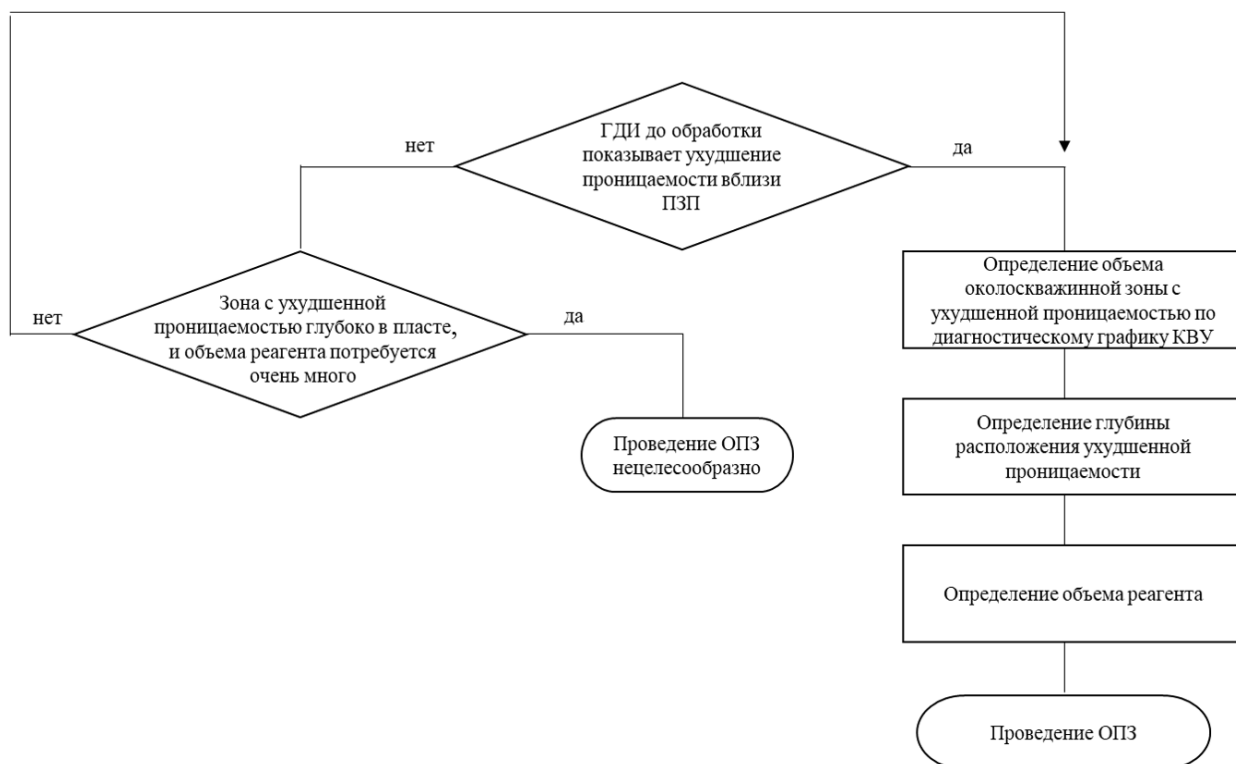


Рис. 6. Блок-схема определения объема реагента для проведения кислотной обработки

Fig. 6. Flowchart for determining the volume of reagent for carrying out acidizing

По диагностическому графику до обработки скважины выполнена оценка объема зоны ухудшенной проницаемости и требуемое количество объема кислотного состава для обработки. Далее выполнено сопоставление с фактическим значением объема закаченного в пласт кислотного состава. Если рассчитанное по модели значение объема ниже фактического значения объема, а обработка при этом оказалась успешной (критерием успешности СКО являлся устойчивый прирост дебита скважины по жидкости после обработки), то делается вывод о подтверждении гипотезы и, соответственно, работоспособности методики. Если по модели значение объема больше, чем фактическое значение, а обработка не успешна, то снова делается вывод – методика работоспособна.

Если по модели объём околоскважинной зоны с ухудшенной проницаемостью определяется значительным, то представляется логичным предположить, что на такой скважине успешность от обработки будет низкая. Однако без оценки объема околоскважинной зоны, используя диагностический график по предлагаемой методике, невозможно предсказать результативность кислотной обработки. В подобном случае использование предлагаемой методики позволяет избежать материальных и временных потерь на проведение кислотной обработки и проводить обработку пласта только на тех скважинах, на которых имеется потенциал для этого.

Анализ показал, что для 21 из 26 отобранных для анализа скважин наблюдается совпадение гипотезы и отмечается работоспособность модели (табл. 2). Критериями работоспособности модели являются успешность обработки: увеличение дебита скважины и поддержание его в течение нескольких месяцев, либо неуспешность обработки в результате недостаточного закаченного объема реагента. Коэффициент полезного действия (КПД) закаченного в пласт объема реагента оценен как $KPD = V_m / V_{\phi} \times 100 \%$, где V_m – объем, рассчитанный по предлагаемой модели, V_{ϕ} – фактический объем затраченного реагента. Из табл. 1 видно, что без учета стоимости проведения скважинных операций (время работы сервисной бригады) затраты на реагент, который был перерасходован, составляют 11,5 млн р. (из расчета, что средняя стоимость 1 м³ равна 20 тыс. р., всего перерасход по модели на успешных скважинах 359 м³, а закаченный в недостаточном количестве реагент на неуспешных скважинах 218 м³). Если учесть, что у крупных компаний-недропользователей с большим фондом добывающих скважин в год проводится несколько сотен кислотных обработок с неоптимальным объемом реагента, переплачиваемая компаниями стоимость составляет более ста миллионов рублей в год.

На 13 скважинах, подтверждающих методику, был выбран объем кислотного состава больше объема ПЗП и получен эффект, поэтому можно оцени-

вать непроизводительный расход кислотного состава и определять КПД закаченного объема. На 8 скважинах планируемый эффект от ОПЗ не был достигнут, так как объем закаченного реагента был меньше по сравнению с объемом ПЗП, что также подтверждает методику. Факторный анализ оставшихся пяти из 26 скважин продемонстрировал, что по некоторым двум эффект был достигнут после обработки не за счет роста $K_{\text{прод}}$, а за счет оптимизации режима работы глубинно-насосного оборудования (ГНО) с увеличением депрессии на пласт за счет наличия потенциала по забойному давлению.

Таблица 2. Результаты анализа эффективности ОПЗ по предлагаемой методике

Table 2. Results of the treatment effectiveness analysis on the method proposed

Скважина Well	Объем реагента, м ³ Reagent volume, m ³		Закачено слишком много/мало реагента Too much/too little reagent injected	КПД закаченного объема реагента Efficiency of the injected volume of reagent, %
	по моде- ли by model	факти- чески in fact		
1/1	4,3	25	много/much	17,2
1/2	64	30	мало/little	0
1/3	151	20	мало/little	0
2/1	188	40	мало/little	0
2/2	44	23	мало/little	0
2/3	63	70	много/much	90
2/4	2	20	много/much	10
2/5	78	18	мало/little	0
2/6	86	12	мало/little	0
2/7	24	25	много/much	96
3/1	27	70	много/much	38,6
4/1	15	30	много/much	50
5/1	28	50	много/much	56
6/1	13	45	много/much	29
7/1	4	30	много/much	13,3
1/4	74	25	мало/little	0
8/1	77	50	мало/little	0
9/1	44	100	много/much	44
9/2	1	80	много/much	1,2
10/1	17	20	много/much	85
11/1	3	40	много/much	7,5
Средний КПД/Average efficiency				41,4 %
Суммарный перерасход реагента в объемном выражении Total overconsumption of reagent in volume terms				577 м ³ /м ³
Суммарный перерасход реагента в финансовом выражении Total overconsumption of reagent in financial terms				11,5 млн р. million rubles

В результате тестирования методики и анализа промысловых данных выявлено девять факторов (приведены ниже), которые определяют успешность ее применения в зависимости от условий работы скважин.

Фактор 1. Тип коллектора

Освоение добывающих скважин в карбонатных коллекторах, как правило, выполняется совместно с

кислотными обработками, которые растворяют в ПЗП некоторый объем горной породы, в результате чего образуются хорошо проводимые каналы фильтрации жидкости из пласта в скважину.

Для терригенного коллектора без проведения проппантного гидроразрыва пласта характерно наличие несовершенства скважины по характеру вскрытия практически во всех случаях. Также в отличие от карбонатного коллектора для терригенного коллектора успешность кислотной обработки зависит от множества других факторов, в частности, от содержания глинистых частиц в цементе горной породы, минералогического состава глинистых частиц и др. Предлагаемая в настоящей работе методика ориентирована исключительно на кислотные обработки карбонатных коллекторов, где механизм достижения эффекта связан с растворением горной породы, а не с удалением колюматизирующих частиц в поровом пространстве, что характерно для терригенных пластов.

Фактор 2. Срок между ГДИ и ОПЗ

В случае если с момента проведения ГДИ прошел год или больше, нужно с осторожностью использовать предлагаемую методику. Особенностью является то, что в модель закладываются результаты исследований, которые к моменту проведения ОПЗ становятся неактуальными, если за рассматриваемый период произошло изменение условий работы скважины, например: колюматация ПЗП, снижение дебита скважины более чем на 10 %, значительное снижение пластового давления и другие факторы. При подстановке в модель параметров, полученных при ГДИ, результирующее значение объема ПЗП ухудшенной проницаемости не будет совпадать с данными на момент проведения ОПЗ. В подобном случае для использования методики перед планированием кислотной обработки требуется предварительно проводить ГДИ. В то же время если за рассматриваемый период значительных изменений не произошло, методика может применяться.

Фактор 3. Достоверность промысловых данных

Перед проведением СКО для использования методики требуется убедиться, что динамика технологических показателей (например, дебит скважины по жидкости) достоверна и значения параметров в базах данных верны. Одним из примеров ошибочных данных может являться некорректный (завышенный) замер расхода жидкости скважин на автоматизированной групповой замерной установке. В результате подобных замеров эффективность ОПЗ будет скрыта завышенными показателями дебита скважины.

Фактор 4. Газовый фактор

В зависимости от метода, применяемого при ГДИ, газовый фактор может оказывать различное влияние на работоспособность предлагаемой методики.

В случае исследования методом КВУ низкий газовый фактор не влияет на график КВУ в момент проведения ГДИ. Если при фильтрации нефти отмечается высокий газовый фактор, то при КВУ применять методику нельзя, так как за счет высокого газового фактора (ГФ) будет вспениваться жидкость и искажать показания измерительного устройства. При умеренно высоком ГФ применять методику требуется с осторожностью. Рекомендуемое значение ГФ составляет не более $100 \text{ м}^3/\text{т}$, хотя для различных месторождений и даже отдельных скважин это соотношение индивидуально.

В случае исследования методом КВД, когда производится прямой замер забойного давления, не искаженный вспениванием жидкости, предлагаемая методика работает даже в условиях очень высокого ГФ. Из опыта компаний-недропользователей отмечена работа методики на скважинах с ГФ более $1000 \text{ м}^3/\text{т}$ при условии интерпретации данных, полученных методом КВД.

Фактор 5. Обводненность скважиной продукции

Предлагаемая методика применима для скважин с низкой обводненностью скважинной продукции. Аналогично влиянию высокого ГФ, на высокообводненных скважинах (с обводненностью выше 50 % для месторождений Пермского края) наблюдается эффект образования скин-фактора в ПЗП за счет снижения фазовой проницаемости как по нефти, так и по воде. Это явление снижает точность методики, в результате чего на скважинах с обводненностью выше 50 % ее следует применять с осторожностью. При этом в большинстве случаев кислотные обработки на высокообводненных скважинах приводят к увеличению дебита жидкости с ростом обводненности продукции. В таких случаях рекомендуется применять эмульсионные или гелеобразующие отклонители кислотного состава. В любом случае повышенная обводненность является рискованной составляющей при применении предлагаемой методики и применять ее на высокообводненных скважинах рекомендуется авторами лишь после накопления существенного опыта обработок низкообводненных скважин с учетом особенностей отдельного месторождения.

Фактор 6. Удаленность добывающей скважины от нагнетательной

В случае если добывающая скважина находится под влиянием нагнетательной скважины, необходимо использовать аккуратно данные ГДИ. Особенностью является то, что в подобных случаях перегиб на диагностическом графике соответствует моменту времени, когда давление в скважине восстановилось за счет влияния жидкости нагнетательной скважины. Закладывая в модель депрессию, полученную напрямую из результатов ГДИ без вдумчивого анализа, можно таким образом

провести некорректный расчет объема ПЗП с ухудшенной проницаемостью.

Фактор 7. Конструкция ствола скважины

Конструкция ствола скважины (профиль) роли не играет. Методика применима к вертикальным, наклонно-направленным и горизонтальным скважинам. Однако стоит отметить, что скважины, законченные горизонтальным открытым стволом, а также скважины с многостадийным гидроразрывом пласта и многозабойные скважины отличаются очень высокими объемами ПЗП и, как правило, требуют очень высоких объемов кислотного состава.

Фактор 8. Оптимизация ГНО

Используя предлагаемую методику при анализе промысловых данных, нужно иметь в виду, что результативность от ОПЗ может быть искусственно завышена за счет оптимизации режима работы глубинно-насосного оборудования. Такое может наблюдаться в случаях, когда модельный расчет демонстрирует отсутствие результата (из-за недостаточного объема закаченного реагента), а фактически эффект от ОПЗ получен положительный.

Фактор 9. Тип скважины

Предлагаемая методика применима как к добывающим, так и к нагнетательным скважинам. По данным исследований методом кривой падения давления можно оценить объем околоскважинного пространства ухудшенной проницаемости. В отличие от добывающих нефтяных скважин, кольматация на нагнетательных скважинах обычно происходит более интенсивно (особенно в условиях низкого качества подготовки закачиваемой в пласт воды), что практически всегда проявляется в низком объеме ПЗП.

На сегодняшний день критериями проведения кислотных обработок пласта на добывающих скважинах в российских компаниях-недропользователях зачастую являются:

- снижение дебита скважины по жидкости (при этом нет тенденции на снижение пластового давления) и снижение коэффициента продуктивности скважины;
- резкое падение дебита скважины, в результате чего принимается решение о проведении кислотной обработки без анализа данных работы скважины;
- кислотная обработка на соседней скважине показала эффективность, в результате чего принимается решение, что кислотная разработка на рассматриваемой скважине будет также эффективна.

В подобных случаях проведения кислотных обработок без учета предлагаемой методики вероятно отсутствие эффекта, что связано с недостаточным объемом реагента для снятия кольматации на границе ПЗП. Также в случае, если в поровом про-

странстве ПЗП присутствуют парафиновые отложения, в дизайне кислотной обработки рекомендуется предусматривать частотное воздействие [27–29], что позволит мобилизовать парафины.

Заключение

В работе выполнен анализ результатов ГДИ добывающих скважин в карбонатных отложениях, на которых проводились кислотные обработки. Выполнено сопоставление полученных результатов с промысловыми данными эксплуатации скважин до и после обработки. Предложено оценивать объем прискважинной зоны, требующей обработки для восстановления проницаемости, на основании данных ГДИ. Разработана методика определения оптимального объема химического реагента для проведения кислотных обработок по данным ГДИ. По результатам исследований можно отметить следующие выводы:

1) использование результатов ГДИ скважин позволяет в дизайне кислотной обработки учесть актуальное состояние пласта прискважинной зоны (расстояние от скважины, на котором расположена зона ухудшенной проницаемости) и дополнить расчеты, основанные на объемном методе;

2) средний коэффициент полезного действия закаченных объемов кислоты по данным 13 добывающих скважин, на которых ОПЗ были результативны, составляет 41,4 %, что не является высоким показателем; помимо этого на 8 добывающих скважинах объем фактически закаченного реагента был недостаточен, ввиду чего КПД нулевой;

3) на 13 скважинах, подтверждающих методику, был выбран объем кислотного состава больше объема ПЗП и получен эффект, поэтому можно оценивать непроизводительный расход кислотного состава и определять КПД закаченного объема; на 8 скважинах планируемый эффект от ОПЗ не был достигнут, так как объем закаченного реагента был меньше по сравнению с объемом ПЗП, что также подтверждает работоспособность методики;

4) использование разработанной методики в дизайне кислотных обработок может повысить эффективность расходования химического реагента и сократить затраты недропользователя;

5) выявлено девять факторов, определяющих условия применимости предложенной методики и результативность кислотной обработки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. Lufeng Z., Fujian Z., Shicheng Z., Zhun L., Jin W., Yuechun W. Evaluation of permeability damage caused by drilling and fracturing fluids in tight low permeability sandstone reservoirs. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2019, vol. 175, pp. 1122–1135.
2. Galal S.K., Elgibaly A.A., Elsayed S.K. Formation damage due to fines migration and its remedial methods. *Egyptian Journal of Petroleum*, 2016, vol. 25, no. 4, pp. 515–524.
3. Kozhevnikov E.V., Turbakov M.S., Riabokon E.P., Gladkikh E.A. Apparent permeability evolution due to colloid migration under cyclic confining pressure: on the example of porous limestone. *Transport in Porous Media*, 2023, vol. 151, pp. 263–286.
4. Coulter G.R., Jennings A.R. A contemporary approach to matrix acidizing. *SPE Production & Facilities*, 1999, vol. 14, pp. 150–158.
5. Amro M.M. Laboratory study and field matching of matrix acidizing of petroleum reservoir rocks. *Journal of King Saud University – Engineering Science*, 2002, vol. 14, no. 1, pp. 119–135.
6. Mota T.M., Rachmat S. Parametric wormhole studies on matrix acidizing carbonate reservoir. *Timor-Leste Journal of Engineering and Science*, 2020, vol. 1, no. 1, pp. 11–27.
7. Palharini Schwalbert M., Aljawad M.S., Hill A.D., Zhu D. Decision criterion for acid-stimulation method in carbonate reservoirs: matrix acidizing or acid fracturing? *SPE Journal*, 2020, vol. 25, no. 5, pp. 2296–2318.
8. Dankwa O.K., Appah D., Of J., Ek A. Compatibility: a key to an efficient matrix acidizing fluid design. *Journal of Petroleum & Environmental Biotechnology*, 2016, vol. 7, pp. 1–5.
9. Aurianto M.P.D., Maulana D.T., Chandra S. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2022, vol. 1014, 012015.
10. Alameedy U., Al-Haleem A.A., Almalichy A. Well performance following matrix acidizing treatment: case study of the Mi4 unit in Ahdeb oil field. *Iraqi Journal of Chemical and Petroleum Engineering*, 2022, vol. 23, no. 4, pp. 7–16.
11. Alkathim M., Aljawad M.S., Hassan A., Alarifi S.A., Mahmood M. A data-driven model to estimate the pore volume to breakthrough for carbonate acidizing. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 2023, vol. 13, pp. 1789–1806.
12. Dargi M., Khomehchi E., Mahdavi Kalatehno J. Optimizing acidizing design and effectiveness assessment with machine learning for predicting post-acidizing permeability. *Scientific Reports*, 2023, vol. 13, 11851.
13. Hatamizadeh A., Sedaee B. Simulation of carbonate reservoirs acidizing using machine and meta-learning methods and its optimization by the genetic algorithm. *Geoenergy Science and Engineering*, 2023, vol. 223, 211509.
14. Kristanto G.W., Ratnaningsih D.R., Kristanto D. Matrix acidizing optimization for screened sandstone formation at high-rate gas well of deepwater GWK-8. *International Journal of Petroleum Technology*, 2022, vol. 9, pp. 33–43.
15. Herianto T. Improving effective porosity of rocks with matrix acidizing stimulation on sand stone formation. *International Journal of Innovative Research & Development*, 2018, vol. 7, no. 9, pp. 282–292.
16. Leong V.H., Ben Mahmud H. A preliminary screening and characterization of suitable acids for sandstone matrix acidizing technique: a comprehensive review. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 2019, vol. 9, pp. 753–778.
17. Chacon O.G., Pournik M. Matrix acidizing in carbonate formations. *Processes*, 2022, vol. 10, no. 174, 18 p.
18. McLeod H.O. Matrix Acidizing. *Journal of Petroleum Technology*, 1984, vol. 36, no. 12, pp. 2055–2069.

19. Hou B., Qui K., Chen M., Jin Y., Chen K.P. The wellbore collapse on sandstone formation during well test with matrix acidizing treatment. *Petroleum Science and Technology*, 2013, vol. 31, no. 3, pp. 237–249.
20. Xiong H. Prediction of effective acid penetration and acid volume for matrix acidizing treatments in naturally fractured carbonates. *SPE Production & Facilities*, 1994, vol. 9, no. 3, pp. 188–194.
21. Rbeawi S.A., Kadhim F.S., Farman G.M. Optimum matrix acidizing: how much does it impact the productivity. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, vol. 454, 012105.
22. Boonyapaluk P., Hareland G. Optimum acid volume estimation using real-time skin evaluation. *Proceedings of SPE Latin America/Caribbean Petroleum Engineering Conference*. Port-of-Spain, Trinidad, April 1996. 381 p.
23. Prouvost L.P., Economides M.J. Applications of real-time matrix-acidizing evaluation method. *SPE Production Engineering*, 1989, vol. 4, no. 4, pp. 401–407.
24. Crowe C., Masmonteil J., Thomas R. Trends in matrix acidizing. *Oilfield Review*, 1992, vol. 4, no. 4, pp. 24–40.
25. Krivoshchekov S.N., Kochnev A.A., Ravelev K.A. Development of an algorithm for determining the technological parameters of acid composition injection during treatment of the near-bottomhole zone, taking into account economic efficiency. *Journal of Mining Institute*, 2021, vol. 250, pp. 587–595.
26. Fogler H.S., McCune C. On the extension of the model of matrix acid stimulation to different sandstones. *AIChE Journal*, 1976, vol. 22, no. 4, pp. 799–805.
27. Riabokon E., Gladkikh E., Turbakov M., Kozhevnikov E., Guzev M., Popov N., Kamenev P. Effects of ultrasonic oscillations on permeability of rocks during the paraffinic oil flow. *Géotechnique Letters*, 2023, vol. 13, no. 3, pp. 151–157.
28. Riabokon E., Gladkikh E., Turbakov M., Kozhevnikov E., Guzev M., Yin Q. The effect of ultrasonic alternating loads on restoration of permeability of sedimentary rocks during crude paraffinic oil flow. *Applied Sciences*, 2023, vol. 13, 11821.
29. Riabokon E.P., Kazantsev A.L., Gladkikh E.A., Turbakov M.S. Development of an experimental set-up for studying the effect of elastic oscillations on fluid flow through rocks. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2022, vol. 1021, no. 1, 012016.

Информация об авторах

Александр Викторович Юрин, ведущий инженер отдела разработки месторождений нефти и газа Управления разработки нефтяных и газовых месторождений ООО «ЛУКОЙЛ-ПЕРМЬ», Россия, 614068, г. Пермь, ул. Ленина, 62. Alexandr.Yurin@lp.lukoil.com

Евгений Павлович Рябоконт, научный сотрудник кафедры нефтегазовых технологий, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Россия, 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29. riabokon@pstu.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0555-3977>

Поступила в редакцию: 06.10.2023

Поступила после рецензирования: 27.11.2023

Принята к публикации: 19.06.2024

Information about the authors

Aleksandr V. Yurin, Lead Engineer, LUKOIL-PERM LLC, 62, Lenin street, Perm, 614068, Russian Federation. Alexandr.Yurin@lp.lukoil.com

Evgenii P. Riabokon, Researcher, Perm National Research Polytechnic University, 29, Komsomolsky avenue, Perm, 614990, Russian Federation. riabokon@pstu.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0555-3977>

Received: 06.10.2023

Revised: 27.11.2023

Accepted: 19.06.2024

УДК 544.723.21

DOI: 10.18799/24131830/2024/8/4484

Шифр специальности ВАК: 2.6; 2.6.7

Сорбенты на основе вспененного фосфатного стекла для сбора нефтепродуктов с загрязнённых почв и водных поверхностей

К.Г. Карапетян[✉], И.В. Дорош, П.В. Згонник, А.Д. Коршунов, А.И. Перина

Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Россия, г. Санкт-Петербург

[✉]Karapetyan_KG@pers.spmi.ru

Аннотация. Актуальность. Обусловлена необходимостью очистить почву и акватории, загрязненные отходами нефтяной и химической промышленности. Физико-химические методы являются одними из эффективных способов очистки при условии своевременного применения сорбентов для сбора загрязнений с поверхности акваторий и ландшафтов. Сорбционный метод является наиболее эффективным и экономически выгодным при сравнительно небольших масштабах загрязнения. Несмотря на многообразие существующих сорбентов, в большинстве случаев при ликвидации аварийных разливов, прежде всего, руководствуются экономической выгодой и значением нефтеёмкости сорбента. Однако редко обращают во внимание такие существенные критерии, как: 1) основное назначение (тип загрязняемой поверхности и характер загрязнения); 2) физико-химические свойства, включая структурные характеристики и кислотно-основные центры адсорбции; 3) особенности процессов нефтепоглощения либо адсорбции других загрязнителей. При учёте данных факторов появляется возможность разрабатывать и улучшать рецептуру сорбентов на основе фосфатных пеностёкол. Введение различных модифицирующих добавок в состав материала, вероятно, расширит их область использования. **Цель.** Отработка рецептурно-технологических особенностей получения новых фосфатных сорбентов применительно к их целевому назначению: для сбора разливов нефти и нефтепродуктов с почв либо с водных поверхностей. **Методы.** Гравиметрические, микроскопические спектроскопические, статистические и сравнительные методы. **Результаты и выводы.** Проведено сравнение сорбентов № 1 и 2 по физико-химическим свойствам, морфологии и эффективности очистки. На основании проведённых нами лабораторных исследований сделан вывод, что сорбент № 1 лучше подходит для сорбции с водных поверхностей, а сорбент № 2 – для очистки почв. Оба сорбента обладают потенциалом, позволяющим улучшить их технологические свойства. Это позволяет дорабатывать рецептуру данных материалов с последующей апробацией в лабораторных и в натурных условиях, например, на местах разлива нефтепродуктов. Для этого можно изменить состав материала, используя иной вспениватель, применяя модифицирующие добавки и варьируя температурный режим обжига. Разработка новых составов и методов вспенивания сорбента позволит подобрать оптимальные характеристики для каждого типа загрязнения. Также предложено создание фосфатного биосорбента, получаемого путём иммобилизации грибов и бактерий на поверхность высокопористого носителя. В таком случае после сорбции загрязнения адсорбированные вещества подвергнутся биодеструкции с образованием безопасных продуктов, а сорбент выполнит роль удобрения.

Ключевые слова: сбор, очистка, утилизация, физико-химические свойства, фосфатный нефтесорбент, поверхность, загрязнители, рецептура, биосорбент, иммобилизация

Для цитирования: Сорбенты на основе вспененного фосфатного стекла для сбора нефтепродуктов с загрязнённых почв и водных поверхностей / К.Г. Карапетян, И.В. Дорош, П.В. Згонник, А.Д. Коршунов, А.И. Перина // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 8. – С. 227–240. DOI: 10.18799/24131830/2024/8/4484

UDC 544.723.21

DOI: 10.18799/24131830/2024/8/4484

Sorbents based on foamed phosphate glass for collecting petroleum oil products from contaminated soils and water surfaces

K.G. Karapetyan[✉], I.V. Dorosh, P.V. Zgonnik, A.D. Korshunov, A.I. Perina

Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, St. Petersburg, Russian Federation

[✉]Karapetyan_KG@pers.spmi.ru

Abstract. Relevance. The need to clean from pollution soils and water areas contaminated with oil and chemical industry wastes. Physico-chemical methods are one of the effective ways of cleaning, provided that sorbents are applied in time to collect contaminants from the surface of water areas and landscapes. Sorption is the most efficient and cost-effective method for relatively small scale pollution. Despite the variety of existing sorbents, in most cases when cleaning up accidental spills, first of all, economic benefits and oil capacity value of the sorbent are guided. However, such essential criteria as: 1) main purpose (type of polluted surface and nature of pollution); 2) physical and chemical properties, including structural characteristics and acid-base adsorption centers; 3) peculiarities of oil or other pollutants adsorption. Taking into account these factors, it is possible to develop and improve the formulation of sorbents based on phosphate foams. Introduction of various modifying additives into material composition is likely to expand their field of application. **Aim.** Development of formulation and technological features of obtaining new phosphate sorbents in relation to their intended purpose: for collecting oil and petroleum product spills from soil or water surfaces. **Methods.** Gravimetric, microscopic spectroscopic, statistical and comparative methods. **Results and conclusions.** The authors have compared sorbents no. 1 and 2 in terms of physical and chemical properties, morphology and cleaning efficiency. Based on our laboratory studies, we concluded that sorbent no. 1 is better suited for sorption from aqueous surfaces and sorbent no. 2 is better suited for soil cleaning. Both sorbents have the potential to improve their technological properties. This allows refining the formulation of these materials with further testing in laboratory and field conditions, for example, at oil spill sites. For this purpose, it is possible to change the material composition using a different foaming agent, applying modifying additives and varying the temperature mode of firing. Development of new compositions and methods of sorbent foaming will make it possible to select optimal characteristics for each type of contamination. The author proposed as well to create phosphate biosorbent obtained by immobilization of fungi and bacteria on the surface of highly porous carrier. In this case, after sorption of pollution, adsorbed substances will undergo biodegradation with the formation of safe products, and the sorbent will perform the role of fertilizer.

Keywords: collection, purification, utilization, physicochemical properties, phosphate oil sorbent, surface, contaminants, formulation, biosorbent, immobilization

For citation: Karapetyan K.G., Dorosh I.V., Zgonnik P.V., Korshunov A.D., Perina A.I. Sorbents based on foamed phosphate glass for collecting petroleum oil products from contaminated soils and water surfaces. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 8, pp. 227–240. DOI: 10.18799/24131830/2024/8/4484

Введение

Основными областями применения нефти является энергетика и нефтехимический синтез. В большинстве развитых стран нефть является основным источником энергии и применяется как сырьё для производства топлива. Другой, не менее важной, областью применения нефти является нефтехимия. На основе нефтепродуктов получают большинство растворителей, смазочных масел, пластмасс, композиционных материалов, связующих для лакокрасочной промышленности, косметических препаратов и многих других видов продукции. Самыми крупными производителями нефти являются: Россия, Саудовская Аравия, США, Иран и Ирак. Добыча, транспортировка и переработка (ДТП) нефти, является важным сектором мировой экономики, в котором

задействованы многие страны. В то же время при добыче, транспортировке и переработке нефти неизбежно происходит систематическое загрязнение окружающей среды углеводородами, что существенно увеличивает антропогенную нагрузку. Высокий уровень ДТП приводит к повышенному износу оборудования, что одновременно с влиянием человеческого фактора увеличивает риски аварий, приводящих к загрязнению природных ландшафтов и акваторий [1]. Это влечёт за собой деградацию земель, уже не способных к самовосстановлению из-за чрезмерных антропогенных нагрузок. Количество загрязнённых земель в процессе ДТП превышает количество восстановленных (рекультивированных). Перечень крупнейших аварий, приведённый в хронологическом порядке, показывает масштаб проблемы.



Рис. 1. Хронология масштабных разливов нефти в мире [составлено авторами]

Fig. 1. Chronology of the largest oil spills in the world [compiled by the authors]

На рис. 1 приведена хронология крупнейших случаев разливов нефти.

В результате аварийных разливов нефтепродуктов происходит деградация земель, гибель флоры, фауны, истощение водных ресурсов и многие другие негативные последствия [2]. Самовосстановление загрязнённых ландшафтов может занять многие десятки лет [3, 4]. Поэтому разработка методов и средств по сбору загрязнений различной природы с грунтов и водных поверхностей является важной составляющей частью устойчивого развития минерально-сырьевого комплекса [5, 6]. Существуют несколько методов удаления нефтепродуктов с загрязнённых поверхностей: механический, химический, биологический, термический. Эти методы целесообразно использовать совместно: например, физико-химический и биологический метод. Физико-химические методы, в свою очередь, подразделяются на «чисто» химические, приводящие к осаждению нефти с водных поверхностей либо разрушению нефтяных плёнок, и сорбционные, основанные на поглощении нефти теми или иными пористыми адсорбентами. Химические методы базируются на применении диспергентов, которые в большинстве своём являются высокотоксичными и наносят вред водным организмам, кроме того, нередко они вызывают вторичные загрязнения [7]. В силу указанных обстоятельств сорбционные технологии являются наиболее предпочтительными. В настоящее время используются сорбционные материалы органического [8–10], неорганического [11], синтетического [12] и биологического происхождения [13], каждый из которых имеет свои достоинства и недостатки. Отходы некоторых производств могут использоваться как материал для изготовления сорбентов [14–16]. К последним интересным разработкам в этой области относятся биоугли, которые косвенно можно считать биологическими сорбционными материалами, так как получают их из сельскохозяйственных отходов термическим воздействием – пиролизом [17]. Биоуголь имеет схожие характеристики с активированным углём, однако ему присущ недостаток, характер-

ный для большинства материалов, заключающийся во вторичном загрязнении и накоплении полиароматических соединений в почве [18].

Биологический метод обеспечивает не только сбор, но и более или менее полную переработку собранных загрязнений с использованием различных микроорганизмов, таких как грибы, водоросли, бактерии. Совместное применение сорбционных и биологических методов способствует ускорению процесса очистки и упрощает сбор, обеспечивая утилизацию отработанных сорбционных материалов за счёт биодеструкции и растворения адсорбента [19]. Даже при широком многообразии сорбционных материалов сохраняется проблема их оптимального подбора. В большинстве случаев редко учитывают характер загрязнённой поверхности, приписывая какому-либо одному конкретному сорбенту так называемую «универсальность» – возможность использования одного и того же сорбента как для водных поверхностей, так и для почв. Наиболее эффективными будут сорбенты, имеющие целевое назначение либо для очистки почв, либо для водных поверхностей (ВП). Некоторые авторы считают, что такие «универсальные» сорбционные материалы существуют [20, 21]. Для того, чтобы сделать корректные выводы относительно границ применения того или иного сорбционного материала, необходимо с одной стороны иметь представления о его физико-химических свойствах, а с другой – располагать результатами его реальной апробации. Большинство разрабатываемых сорбентов апробируется в лабораторных условиях и не доходят до промышленных масштабов.

Проведённый анализ патентов показывает, что по запросу «очистка водных акваторий от нефтепродуктов» зарегистрировано 243 патента, из них: 1) 215 в России; 2) 13 патентов в Patent cooperation treaty (PCT); 3) 9 в Евразийском патентном ведомстве; 4) 5 в Казахстане; 5) 3 в СССР. Наибольшее количество изобретений наблюдается в 2017 и 2019 гг. [22]. При этом по запросу «очистка почв от нефтепродуктов» зарегистрирован 1231 патент, из них: 1) 962 в России; 2) 45 патентов в PCT;

3) 98 в Евразийском патентном ведомстве; 4) 122 в Казахстане; 5) 4 в СССР. Исходя из этих данных, можно сделать вывод о том, что количество зарегистрированных патентов по запросу «очистка почв от нефтепродуктов» превосходит количество патентов по запросу «очистка водных акваторий» [22].

Между количеством патентов, выдаваемых поисковыми системами по двум указанным запросам, наблюдается разница почти в 5 раз. Это может быть обусловлено тем, что количество аварийных разливов нефти в почву, приходящихся на 2017–2019 гг. в РФ, намного больше, чем разливы нефти на водных поверхностях. Рост количества аварийных нефтеразливов требует разработки и внедрения усовершенствованных методов ликвидации с последующей рекультивации. Рекультивация, восстановление загрязнённых земель, – это трудоёмкий процесс, который не ограничивается лишь сорбцией нефтепродуктов с загрязняемой поверхности и состоит из технологического и биологического этапа. Предполагается, что сорбция нефтепродуктов с почв имеет немало особенностей, усложняющих выбор материала. Во-первых, следует учитывать сложный геохимический состав почв. Во-вторых, процесс подготовки к рекультивации требует определённого времени. В-третьих, для корректного выбора технологии необходимо обладать всесторонними знаниями в области химии, биологии, биохимии, геохимии и геоэкологии.

Сложность подбора сорбентов усложняется отсутствием единой базы. Под единой базой следует понимать базу данных (БД) всех имеющихся на рынке нефтесорбентов. Наличие общей БД позволило бы проводить многофакторное сравнение сорбентов между собой, тем самым оптимизировать выбор и прогнозировать эффективность в зависимости от заявленных критериев, влияющих на процесс сорбции [23, 24].

Таким образом, подбор сорбента для сбора углеводородов не ограничивается одними лишь экономическими критериями. Пристального внимания требует определение типа загрязняемой поверхности и факторов, которые бы обеспечивали высокую эффективность очистки. Так, например, для очистки ВП будут важны критерии фазового состояния нефтепродуктов и толщина плёнки на поверхности. В случае с грунтами наблюдается более сложная картина. Помимо сорбции на загрязнённой поверхности происходит проникновение загрязняющих веществ в толщу почвогрунта через открытую порозность частиц почвы. Загрязнения также проникают в открытые поры горных пород и грунтов. Геохимический состав почв каждой загрязнённой территории уникален, что резко усложняет методику подбора подходящего адсорбента. Важным фактором также является застарелость загрязнённой

почвы. Свежие загрязнения, возникшие не ранее чем 3–5 месяцев назад, содержат гораздо больше летучих углеводородов, которые с течением времени испаряются. После этого применение физико-химических методов очистки становится нерентабельным либо, в принципе, невозможным. Например, застарелые загрязнения почв тяжёлыми углеводородами (нефтьшамы) уже практически невозможно очистить с помощью физико-химических методов. Большое многообразие грунтов и почв обуславливают актуальность продолжения исследований в области совершенствования сорбционных технологий очистки ландшафтов.

Перспективными для изучения являются материалы на основе пеностёкол, традиционно используемые в качестве теплоизоляции [25]. Известен ряд пористых материалов на основе синтезированных полимерных волокон и различных отходов, имеющих высокий потенциал для очистки нефтесодержащих вод [26–28]. Процесс получения вспененных материалов является технологически сложным, так как необходимо учитывать физико-химические особенности разложения порообразователя и его взаимодействия со стекломассой [29].

На данный момент в Российской Федерации подобными материалами занимается несколько университетов, в числе которых Санкт-Петербургский горный университет и Южно-Российский государственный политехнический университет (ЮРГПУ). Ученые из ЮРГПУ занимаются силикатными стёклами, исследованием их структуры, улучшением свойств и синтезом теплоизоляционных материалов на основе шлаковых отходов [30, 31]. Применение пеностёкол в качестве нефтесорбентов на основе метафосфатов впервые начали разрабатывать в Санкт-Петербургском горном университете, эффективность данных сорбентов может достигать более 95 % даже после нескольких циклов сорбции. Регенерацию материала можно провести, продувая слой сорбента горячим паром или осуществляя низкотемпературное каталитическое дожигание, при этом структура пор сорбента остаётся практически неизменной. Минимальные потери ёмкости обусловлены накоплением минеральных составляющих загрязнения в порах сорбента.

Принцип поглощения нефти сорбентом стеклообразной природы основан на поглощении углеводородов определёнными областями поверхности адсорбента. В результате этого углеводороды и растворённые в них частицы нефтяной дисперсной фазы задерживаются в порах сорбционного материала, а также в пространстве порозности между его гранулами. В первом приближении описываемый процесс напоминает сбор гидрофобной жидкости обычной губкой, предназначенной для бытового применения. Фосфатный сорбент, поглотивший углеводородное пятно, представлен на рис. 2.



Рис. 2. Поглощение нефтяной пленки фосфатным сорбентом [32]

Fig. 2. Absorption of oil film by phosphate sorbent [32]

Возвращаясь к аналогии с губкой, отметим, что обычные губки не могут удерживать заметные количества поглощённого вещества, в отличие от модифицированных. Модифицированные губки люфа, обработанные воском и графитом, получают в результате термической обработки, после чего достигается краевой угол смачивания до 158° , тем самым проявляется супергидрофобность [33]. При низкой гидрофобности неорганические сорбенты часто тонут после поглощения и могут вторично загрязнять место разлива. Для решения этой проблемы фосфатные сорбенты обрабатывают гидрофобизаторами на основе кремнийорганических соединений, при этом нефтепоглощение обработанных материалов снижается почти в два раза. Однако такой сорбент может быть практически непотопляемым (более 40 дней). Супергидрофобным можно считать сорбент, который сохраняет свою плавучесть больше 72 часов. Сорбент, не обработанный гидрофобизатором, будет иметь лучшие характеристики по нефтепоглощению, но с большей долей вероятности он потонет через 6–9 часов.

В ходе отработки рецептурно-технологических параметров фосфатных сорбентов возможно получение материалов с различными комплексами свойств с целью дальнейшего подбора сорбента, оптимального по своим характеристикам для решения той или иной конкретной задачи. Исходя из этого, в данной работе были исследованы сорбенты близкого химического состава, имеющие, однако, различия в физико-химических особенностях строения поверхности и сорбционных характеристиках. Было проведено сравнение двух схожих по составу фосфатных нефтесорбентов. Данная работа является ещё одним шагом в направлении выработки научно обоснованных критериев классификации сорбентов, что позволит упростить выбор сорбента с заданными характеристиками. Таким образом,

данное исследование демонстрирует комплексный подход к решению поставленных задач, а именно отработки рецептурно-технологического состава и подбора критериев выбора сорбента для решения конкретных экологических задач.

Объекты и методика исследования

Для исследования выбраны два фосфатных сорбента: № 1 СФВТ – стеклообразный фосфатный с выгорающей добавкой торфа, и № 2 СФГ – стеклообразный фосфатный (без добавки торфа) с гидрофобизатором. В обоих случаях состав шихты был следующим: фосфатное стекло – 98 мас. %; аммоний фосфорнокислый двузамещённый – 2 мас. % (вспениватель). При приготовлении образца в шихту дополнительно добавляли торф в расчёте 4 г на 100 г стекла. Указанные сорбенты разработаны специалистами Санкт-Петербургского горного университета. За основу материала взято стеклянное удобрение пролонгированного действия системы $K_2O-(Mg, Ca)O-P_2O_5$. Процесс получения сорбентов состоит из следующих этапов:

- 1) измельчение компонентов на шаровой мельнице;
- 2) просеивание через сито с помощью виброгрохота;
- 3) спекание в муфельной печи при $600^\circ C$.

Для определения ряда физико-химических показателей сравнивали следующие параметры: кажущуюся плотность, насыпную плотность, истинную плотность, плавучесть, нефтепоглощение, прочность, удельную площадь поверхности, пористость. Также определяли элементный состав и кислотно-основные центры адсорбции.

Кажущуюся плотность, насыпную плотность и плавучесть образцов определяли по ГОСТ EN1602-2011 и ГОСТ 16190-70 соответственно. Исследуемый образец измеряли с погрешностью $\pm 0,5$. Далее по результатам трёх измерений определяли плотность как отношение массы изделия к его объёму.

После определения плотности образец помещали в пикнометр, высушивали до постоянной массы и определяли насыпную плотность как отношение массы сорбента к занимаемому объёму.

Плавуемость (водопоглощение) образцов определяли по ГОСТ 33627-2015, проводя динамические испытания на адсорбируемость воды. В целях улучшения гидрофобности сорбента его обрабатывали в растворе силана.

Определение прочности сорбентов проводили согласно ГОСТ 16188-70 с помощью механического барабана. В собранные барабаны насыпали высушенные пробы сорбента, после их истирания содержимое просеивали и высыпали на отдельные конвейеры или противни. Прочность просеянного материала определяли, как отношение массы навески сорбента после опыта к массе навески до опыта.

Удельная площадь поверхности сорбента – это показатель, который характеризует способность сорбента удерживать молекулы адсорбата на своей поверхности. Помимо удельной площади поверхности сорбента важную роль играет микрорельеф поверхности, размер пор и характер пористости, а также локальные неоднородности химического состава и физико-химического облика поверхности. Это позволяет сорбенту эффективно улавливать и удерживать загрязнители или другие вещества. В силу особенностей образца определить удельную площадь сорбента, пористость и распределение пор на основе стандартной процедуры с использованием анализатора Nova Quantachrome 1000 не удалось. Поэтому пористость оценили на основе измерения истинной плотности (ИП). ИП определялась пикнометрическим методом по ГОСТ 51641-2000. Сухой пикнометр взвешивали на весах, после чего его заполняли спиртом до отметки и выдерживали 30 минут в термостате при 25 °С. После выдерживания доливали спирт до отметки и взвешивали заполненный пикнометр. В высушенный пикнометр помещали 1,5 г исследуемого материала и заполняли на одну треть объёма пикнометра смачивающей жидкостью, перемешивая и кипящая в течение получаса на песчаной бане. Далее пикнометр охлаждали, в него доливали спирт на 2 мм ниже метки, после выдерживали в термостате при 25 °С. После выдержки по каплям доводили уровень спирта до метки и взвешивали пикнометр.

Возвращаясь к параметрам нефтесорбента, необходимо отметить, что особенности строения его пор определяет способность поглощать нефтепродукты. Пористость обусловлена наличием в материале множества мелких отверстий, каналов или полостей, в которых может содержаться жидкость или газ. Стеклообразные сорбенты (пеностёкла) представляют собой губчатую систему и содержат поры и полости различной формы и переменного

сечения: закрытые – в толще сорбента, и открытые – на поверхности [34, 35].

Структурные особенности сорбента определялись с помощью сканирующей электронной микроскопии на приборе Tescan Vega 3. Исследование структурных особенностей сорбента играет важную роль в определении его физико-химических свойств. Понимание морфологических особенностей материала позволяет определить: 1) способность к поглощению и удерживанию веществ на поверхности сорбента в зависимости от размера пор; 2) оптимальные параметры пористой структуры и поверхностные свойства; 3) термостабильность и химический состав [36].

Оценка нефтепоглощения (эффективность очистки сорбента в воде) проведена согласно методу Каменщикова. Для этого было подготовлено несколько корзинок из медной сетки, массу которых взвешивали до и после выдержки в нефти. Для опытов использовали нефть марки REBCO (Russian Export Blend Crude Oil). После этого в корзинку вносили 5 г сорбционного материала, каждый раз проводя взвешивание после выдержки и сушки. По окончании эксперимента определяли остаточную концентрацию нефти в воде на анализаторе жидкостей Флюорат-2М. На основании полученных результатов были построены кинетические кривые нефтепоглощения.

Химический состав определяли с помощью рентгенофлуоресцентного анализа (РФА) на приборе Shimadzu EDX-7000P. Состав сорбента отражает наличие и соотношение различных химических элементов в его структуре, данный параметр определяет способность сорбента к адсорбции или поглощению определенных веществ из окружающей среды. Знание элементного состава сорбента позволяет оценить его эффективность и применимость для конкретных задач очистки или разделения веществ.

Анализ кислотно-основных центров. Адсорбция является довольно сложным физико-химическим процессом, в котором участвуют активные центры поверхности сорбента и атомы молекул адсорбата. Вероятно, адсорбция сопровождается также кислотно-основными взаимодействиями по Льюису. Согласно теории Льюиса, кислотами являются соединения, способные принять электронную пару, основаниями – электрондоноры. Расположение кислотно-основных центров неоднородно, так как любое твёрдое тело характеризуется химической микрон неоднородностью поверхности. Наличие неоднородностей приводит к появлению областей с различным характером лиофильности на поверхности материала. Определение состава и содержания образованных центров позволяет судить о том, какие именно активные группы адсорбирует и удерживает различные вещества сорбент на своей поверхности. Преобладание кислотных либо основных центров суще-

ственным образом влияет на лиофильность и сорбционные характеристики поверхности. Определение характера активных центров поверхности фосфатного сорбента выполнено индикаторным методом [37–39]. Перечень индикаторов, использованных для этой цели, представлен в табл. 1.

Таблица 1. Кислотно-основные индикаторы [составлено авторами]

Table 1. Acid-base indicators [compiled by the authors]

Индикатор Indicator	pKa	$\lambda_{\max}$, нм/nm
Этиленгликоль/Ethylene glycol	14,18	295
Индигокармин/Indigo carmine	12,9	610
Тропеолин-О/Tropeolin-O	11,8	440
Нильский голубой/Nile blue	10,5	640
Тимоловый синий/Thymol blue	8,80	430
Бромтимоловый синий/Bromthymol blue	7,3	430
Бромкрезоловый пурпур/Bromocresol purple	6,4	540
Метиловый красный/Methyl red	5,0	430
Бромфеноловый синий/Bromophenol blue	4,1	590
Метиловый оранжевый/Methyl orange	3,46	460
Фуксин/Fuchsin	2,1	540
Бриллиантовый зеленый/Diamond green	1,3	610
Кристаллический фиолетовый/Crystal violet	0,8	580
О-нитроанилин/Ortho-nitroaniline	-0,29	410
Динитроанилин/Dinitroaniline	-4,4	340

Регенерация. В настоящее время проблема сбора и экологически безопасной утилизации большинства использованных неорганических сорбентов таких загрязнителей, как тяжёлые металлы и нефтепродукты, до конца не решена. Большая часть из них не подлежит полной переработке и является вторичным загрязнителем [40, 41]. Поэтому перспективными являются сорбенты, которые после отработки можно регенерировать и использовать повторно. Регенерация сорбента на основе вспененного стекла возможна горячим паром или путём низкотемпературного каталитического дожигания. Термическая регенерация является перспективным методом, так как позволяет сохранить сорбционный материал в практически неизменном виде после нескольких циклов использования и регенерации.

Дальнейшая утилизация фосфатных пеностёкол не сопряжена с заметными сложностями. Оба изучаемых сорбента пригодны к экологически безопасной утилизации, при этом не образуются отходы. Биоразложение может быть достигнуто за счёт грибов и бактерий, иммобилизованных на поверхность сорбента-носителя. Так как в состав вспененного стекла входят ионы К, Mg, Са, микроорганизмы осаждаются на биологически активной поверхности носителя [42]. Комбинированное использование микробиологической ремедиации и нефтесорбентов может быть эффективным методом для очистки загрязнённых территорий от нефтепродуктов.

Результаты исследования и их обсуждение

В ходе теоретических и экспериментальных исследований были определены и сравнены следующие характеристики: кажущаяся плотность, насыпная плотность, плавучесть, нефтепоглощение, прочность, удельная площадь, эффективность очистки ВП, кислотно-основные центры. Результаты исследования обоих сорбентов представлены в табл. 2.

I. *Химический состав* сорбентов практически идентичен. № 1 СФВТ в пересчёте на оксиды имеет состав P_2O_5 – 50 % по массе, K_2O – 20 %, CaO – 15 % и др. № 2 СФГ имеет состав P_2O_5 – 51,2 %, K_2O – 24,6 %, CaO – 15 % и др. Более подробно химический состав отражен в табл. 3. Как видно из результатов анализа, основными в составе пеностёкол являются соединения калия, фосфора и кальция.

II, III. *Кажущаяся и насыпная плотность образца № 1 СФВТ* больше, чем у № 2 СФГ, что может быть связано с наличием выгорающей добавки торфа, добавленной в образец № 1 (4 г на 100 г стекла). Данный показатель говорит о том, что для сбора одинакового по размерам нефтяного пятна сорбента № 2 СФГ потребуется в два раза больше.

IV. *Плавучесть* обоих сорбентов идентична и составляет более 40 дней, это признак супергидрофобности, «непотопляемости». На 30 день в ёмкости с сорбентом № 2 СФГ было замечено выпадение небольших количеств мелкодисперсного осадка. Интересен также тот факт, что при меньшей или средней кажущейся плотности сорбенты сохраняли свою плавучесть намного дольше. В необходимых случаях для достижения надлежащей плавучести второй сорбент (СФГ) обрабатывали гидрофобизатором.

V. Качественно кривые *нефтепоглощения* обоих сорбентов близки, однако сорбент № 1 СФВТ имеет лучшие характеристики. Как показано на рис. 3, локальный максимум нефтепоглощения наблюдается на 12,5 минуте экспозиции сорбента № 1 СФВТ. При этом поглощается 1,07 г/г. У сорбента № 2 СФГ максимальное насыщение происходит на 20 минуте при наблюдаемом поглощении 0,6 г/г. После достижения локальных максимумов (происходит первичное насыщение сорбента) следует переход в стационарный режим, сопровождаемый небольшим снижением нефтепоглощения, причины которого рассмотрены в работе. Наблюдаемый характер кривых обусловлен стеклообразным состоянием поверхности. Можно предположить, что капиллярная пропитка сопровождается частичной десорбцией воздуха из пор, что обуславливает некоторое снижение нефтепоглощения. Далее система переходит в равновесное состояние. Таким образом, нефтепоглощение образцом № 1 СФВТ происходит намного быстрее, чем образцом № 2 СФГ.

Таблица 2. Сравнительные характеристики фосфатных сорбентов [составлено авторами]

Table 2. Comparative characteristics of phosphate sorbents [compiled by the authors]

№	Показатели Indicators	Сорбенты системы $K_2O-(Mg, Ca)O-P_2O_5$ Sorbents of $K_2O-(Mg, Ca)O-P_2O_5$ system	
I	Общее описание сорбента General description of sorbent	СФВТ № 1 [43] (GPBA) Стеклообразный фосфатный с выгорающей добавкой торфа Glassy phosphate with burnable peat additive Состав (composition): Фосфатное стекло (glassy phosphate) – 98 мас. % (wt %); (NH_4) ₂ HPO ₄ – 2 мас. % (wt %); Peat – 4 г на 100 г стекла/ 4 g per 100 g of glass	СФГ № 2 (GPH) Стеклообразный фосфатный Glassy phosphate *При необходимости обработка гидрофобизатором *If necessary, treatment with hydrophobizer Состав (composition): Фосфатное стекло (glassy phosphate) – 98 мас. % (wt %); (NH_4) ₂ HPO ₄ – 2 мас. % (wt %)
II	Кажущаяся плотность, г/см ³ Apparent density, g/cm ³	0,95	0,58
III	Насыпная плотность, кг/м ³ Bulk density, kg/m ³	1,25	0,30
IV	Плаваемость, сут. Buoyancy, pd.	>40	>40
V	Нефтепоглощение, г/г Oil absorption, g/g	1,07 г/г на 12,5 мин 1,07 g/g on 12,5 min	0,6 г/г на 20 минуте 0,6 g/g on 20 min
VI	Прочность, % Strength, %	61	40
VII	Удельная площадь г/см ³ Specific area, g/cm ³	8,5	1
VIII	Пористость, % Porosity, %	63 % мезопоры (mesopore), 37 % макропоры (macropore)	Мезопористый (Mesoporous) 50 % общее (general)
IX	Эффективность очистки водных поверхностей, % Efficiency of cleaning water surfaces, %	Нефть (Oil) 24,7 (mm) – толщина пленки (film thickness) – 96 %	Нефть (Oil) 20 мм (mm) – толщина пленки (film thickness) – 90 %
X	Кислотно-основные центры Acid-base centers	Данные отсутствуют No data available	Преобладание основных центров Predominance of basic centers

Таблица 3. Химический состав фосфатных пеносорбентов [составлено авторами]

Table 3. Chemical composition of the phosphate foam sorbents [compiled by the authors]

Компонент Component	Содержание, мас. % Contents, wt %	
	№ 1 СФВТ (GPBA)	№ 2 СФГ (GPH)
K ₂ O	50	51
CaO	20	25
SiO ₂	15	15
SO ₃	4,5	3
MgO	6	5
Fe ₂ O ₃	2,5	0,5
Прочее/Other	2	0,5

VI. Прочность сорбента № 1 СФВТ примерно в 2 раза выше, чем у образца № 2 СФГ, что, как мы полагаем, может быть связано с тонкими эффектами термической обработки образцов с различным размером пор и, соответственно, скоростью теплопередачи. Образец № 2 СФГ более хрупкий, чем образец № 1 СФВТ.

VII. Удельная площадь сорбента № 1 СФВТ выше в 8,5 раз и составляет 8,5 г/см³ по сравнению с сорбентом № 2, значение которого стремится к

1 г/см³. При таких значениях материала № 2 СФГ определить удельную площадь (распределение пор и пористость) на приборе Quantachrome Nova 1000e невозможно. Поэтому данные значения требуют доработки по методу Клячко–Гурвича.

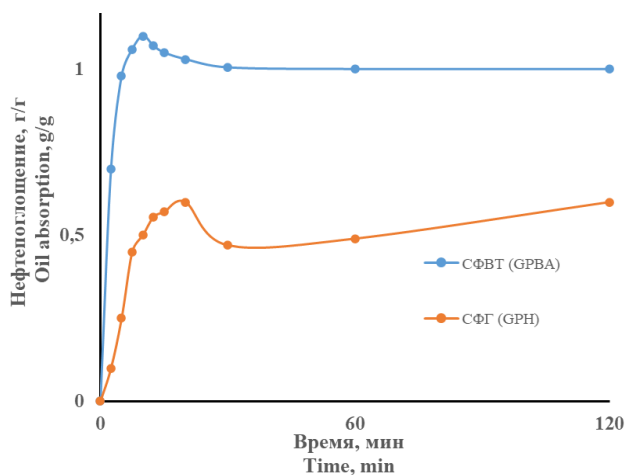


Рис. 3. Кривые зависимости нефтепоглощения от времени [составлено авторами]

Fig. 3. Time dependence curves of oil absorption by samples [compiled by the authors]

VIII. *Пористость*. Образец № 1 СФВТ, состоящий из 63 % мезопор и 37 % макропор, имеет пористость 70 %. Образец № 2 СФГ визуально мезопористый, однако требовал доработки из-за невозможности определения пористости и распределения пор на имеющемся приборе, поэтому была определена ИП. Согласно определению ИП сорбент № 2 СФГ имеет пористость около 50 %.

IX. Оценка эффективности очистки имитированного загрязнения водной поверхности нефтью с различной толщиной плёнок показывает, что сорбент № 1 СФВТ очищает нефтяную пленку толщиной 24,7 мм с 96 % эффективностью. Сорбент № 2 СФГ с меньшей толщиной пленки – 20 мм – эффективен на 90 %.

X. По результатам проведённого анализа на *кислотно-основные центры* индикаторным методом видно, что в исследуемом сорбенте № 2 СФГ преобладают основные центры. Данный факт позволяет говорить о возможности сорбции углеводородов и кислотных соединений нефти. Имеются также слабовыраженные кислотные центры, что говорит

об ограниченной возможности сорбции слабых оснований. Можно предположить, что образец № 1 СФВТ также обладает активностью по отношению к соединениям с кислотными группами.

Проведённый анализ внутренней структуры обоих образцов показал, что при схожих составах образцов наблюдается преимущественно неоднородная пористость, поры имеют округлую форму рис. 4, а, d. Присутствуют мезопоры и макропоры, в более крупных порах присутствуют маленькие поры (рис. 4, а, d, e). Оба сорбента на поверхности имеют открытые поры, закрытые поры находятся внутри больших (рис. 4, а, b, d, e). На образце № 1 СФВТ заметно видны чёткие границы перегородок (рис. 4, а), в отличие от образца № 2 СФГ (рис. 4, d), вероятно, это связано с внесением в шихту ортоборной кислоты и выгорающей добавки торфа. На рис. 4, с видно, что с добавлением торфа сорбент № 1 представляет более мелкопористую структуру. На рис. 4, f наблюдается кристаллизация, образовавшаяся в фазе расплава.

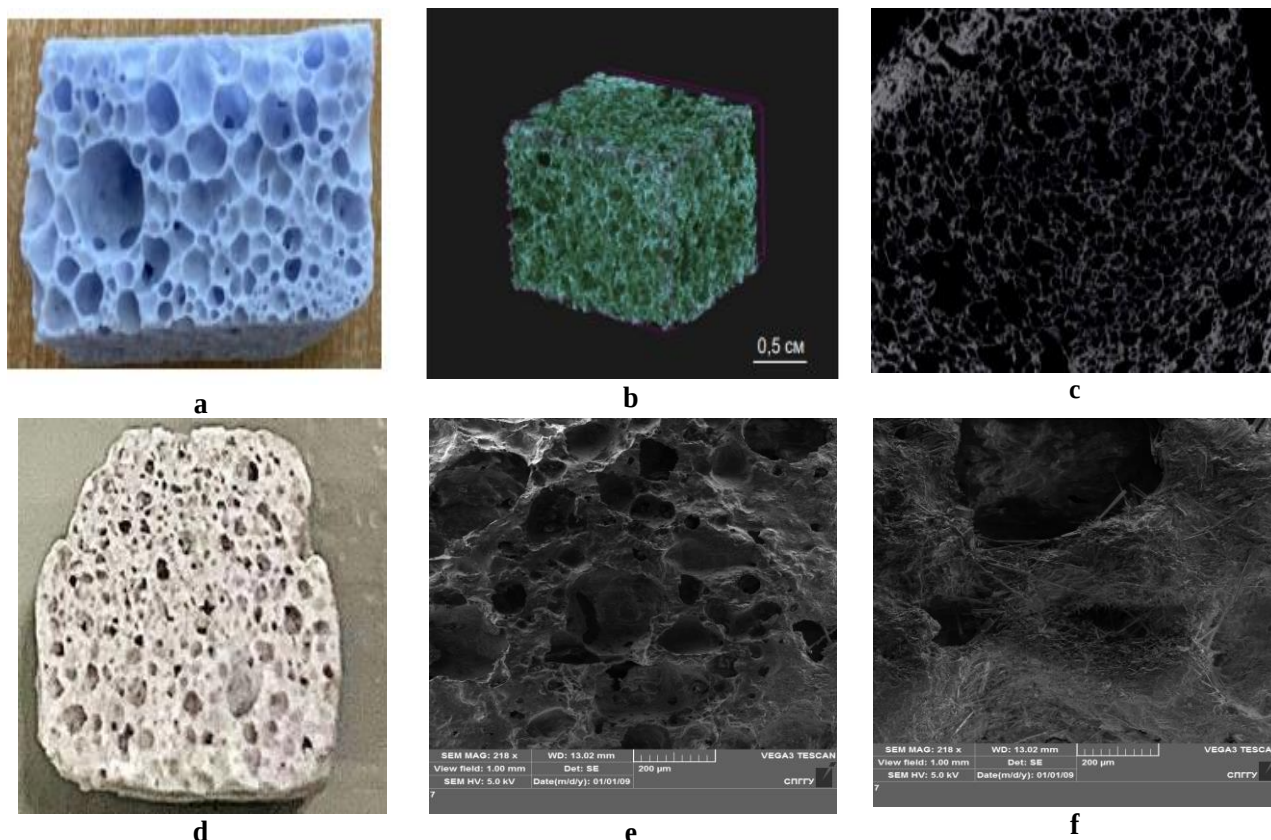


Рис. 4. а) общий вид сорбента № 1 СФВТ; б) снимок компьютерной микротомографии 3D; в) снимок компьютерной микротомографии; д) общий вид сорбента № 2 СФГ; е) снимок сканирующей электронной микроскопии; ф) снимок сканирующей электронной микроскопии (кристаллизация) [составлено авторами]

Fig. 4. а) general view of sorbent № 1; б) 3D computed microtomography image; в) computed microtomography image; д) general view of sorbent № 2; е) scanning electron microscopy image; ф) scanning electron microscopy image (crystallization) [compiled by the authors]

Критерии подбора фосфатных сорбентов

На основе проведенных исследований и сравнения образцов № 1 и 2 были выдвинуты критерии подбора фосфатных сорбентов в зависимости от типа загрязненной поверхности и их физико-химических свойств.

В зависимости от типа загрязняемой поверхности нефтесорбент должен иметь определённый комплекс характеристик. Так, в табл. 3 представлены физико-химические свойства и эксплуатационные характеристики исследуемых фосфатных сорбентов, которые могут быть использованы для комплексной оценки их применимости и эффективности. Приведённые в табл. 3 характеристики сорбентов являются разноплановыми, и их сравнительная значимость зависит от области применения. Для каждого типа загрязняемой поверхности можно выделить основные критерии. Например, сорбенты, используемые для сбора нефти и нефтепродуктов с водной поверхности, должны обладать *плавучестью* и длительное время быть *непотопляемыми*. В случае сорбентов, предназначенных для очистки грунтов, это не является обязательным. С другой стороны, сорбенты, предназначенные для рекультивации почв, должны обладать достаточной механической прочностью и вместе с тем иметь сравнительно невысокий удельный вес. Отдельные требования предъявляются к пористости сорбентов.

Сравнение фосфатных сорбентов СФВТ и СФГ

Сравнив оба сорбента, можно сделать вывод о том, что сорбент № 1 СФВТ лучше подходит для сорбции с ВП благодаря своим характеристикам и отвечает требуемым критериям по большинству параметров: прочность, нефтепоглощение, плавучесть и пористость.

К сожалению, не существует универсального сорбента, одинаково подходящего для сбора всех типов нефтепродуктов. В силу того, что распределение пор по размерам в сорбенте, равно как и вязкость собираемых с поверхности нефтепродуктов, может существенно различаться, в настоящее время не выработано универсальных критериев, позволяющих прогнозировать эффективность сорбционных свойств. Однако существует определённая взаимосвязь между вязкостью нефтепродуктов и средним размером пор сорбента, при котором достигается наибольшая нефтеёмкость.

В настоящей работе мы попытались найти рецептурно-технологические вариации для улучшения поровой структуры сорбента. В частности, введение торфа в состав рецептуры шихты при синтезе сорбента, обуславливающий более равномерную пористость. Вероятно, доля закрытых пор при этом выше, чем в случае рецептуры без торфа, что делает указанный сорбент практически непотопляемым

(более 40 дней) при сохранении высоких значений нефтепоглощения. Рассматриваемый сорбционный материал № 1 СФВТ малорастворим в нейтральной и щелочной среде, при этом хорошо растворяется в кислой среде, в т. ч. в почвенных растворах. Данный сорбент может использоваться также для рекультивации почв, однако различные аспекты его применения в этой сфере требуют более детального исследования с целью определения кислотно-основных центров, структуры и остаточной концентрации нефти в почве.

Сорбент № 2 СФГ подходит больше для очистки загрязнённых почв (рекультивация), так как может отвечать таким критериям, как: прочность, плотность и пористость. В процессе рекультивации производится рыхление почвы, и поэтому важно, чтобы сорбционный материал обладал невысокой насыпной плотностью, но при умеренном механическом воздействии не разрушался. В свою очередь, для того, чтобы обладать достаточной нефтеёмкостью, он также должен быть пористым. Однако в данном случае использовать термин «нефтепоглощение» для оценки эффективности некорректно, так как он относится к сорбции нефтепродуктов с водных поверхностей. Это обусловлено тем, что практически невозможно отследить кинетическую зависимость нефтепоглощения от времени, поскольку основным критерием для её построения является толщина плёнок, которую в почвах определить невозможно. В силу указанных причин с целью оценки пригодности сорбента для очистки загрязнения почв необходимо также оценить остаточную концентрацию нефтепродуктов в почве до и после внесения. Применение сорбента № 2 СФГ для очистки загрязнений ВП нецелесообразно, поскольку он не вполне удовлетворяет предъявляемым требованиям. В сравнении с сорбентом № 1 СФВТ он более хрупкий и имеет меньшее нефтепоглощение.

Таким образом, можно сказать, что оба сорбента подходят для очистки от нефтепродуктов водных поверхностей и грунтов. Однако в обоих случаях необходима доработка составов и получение большего количества образцов для чистоты эксперимента.

Заключение

В настоящей работе проведена отработка рецептурно-технологических параметров, на основании которых проводились дальнейшие исследования физико-химических свойств, структуры и наличия кислотно-основных центров. Экспериментально доказано, что для рекультивации почв предпочтительнее сорбент № 2 СФГ, а для очистки ВП – № 1 СФВТ. Однако оба сорбента требуют доработки базового состава, необходимого для дальнейшего

совершенствования модификации и соответствия желаемым характеристикам.

Изученные образцы также обладают биологической активностью и могут быть применимы в качестве сорбентов-носителей, на поверхность которых можно иммобилизовать различные микроорганизмы. Уникальность разрабатываемого фосфатного

биосорбента будет заключаться в «тройном действии». Процесс очистки сорбентом можно представить, как последовательные действия: 1 – сорбция, 2 – совместная биодеструкция со спорами грибов, 3 – мелиорация. Тройное действие биосорбента может позволить ускорить процесс очистки ВП и почв.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Evaluation of pollutant emissions into the atmosphere during the loading of hydrocarbons in marine oil tankers in the arctic region / V. Fetisov, V. Pshenin, D. Nagornov, Y. Lykov, A. H. Mohammadi // *Journal of Marine Science and Engineering*. – 2020. – Vol. 8. – P. 1–11. DOI: 10.3390/jmse8110917.
2. Depletion of the floodplain-channel complex of the river (Belaya River, Republic of Bashkortostan) / E. Nafikova, D. Alexandrov, A. Platonova, K. Gayanova, K. Chuvashaeva // *E3S Web Conf.* – 2021. – Vol. 244. – P. 7. DOI: 10.1051/e3sconf/202124401012.
3. Huang K., Diao Z., Lu G. Advances in remediation of contaminated sites // *Processes*. – 2023. – Vol. 11 (1). DOI: 10.3390/pr11010157.
4. Korelskiy D.S., Strizhenok A.V., Ismailova D.V. Development and justification of the method of biotechnological reclaiming of oil-contaminated land // *ARP Journal of Engineering and Applied Sciences*. – 2020. – Vol. 15. – P. 342–353.
5. Литвинова Т.Е., Сучков Д.В. Комплексный подход к утилизации техногенных отходов минерально-сырьевого комплекса // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2022. – № 6-1. – С. 331–348. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_61_0_331
6. Dzhevaga N., Lobacheva O. Reduction in technogenic burden on the environment by flotation recovery of rare earth elements from diluted industrial solutions // *Applied Sciences*. – 2021. – Vol. 11 (16). DOI: 10.3390/app11167452.
7. Matveeva V.A., Smirnov Y.D., Suchkov D.V. Industrial processing of phosphogypsum into organomineral fertilizer // *Environmental Geochemistry and Health*. – 2022. – Vol. 44 (5). – P. 1605–1618. DOI: 10.1007/s10653-021-00988-x.
8. Highly efficient and recyclable polyolefin-based magnetic sorbent for oils and organic solvents spill cleanup / H. Kim, G. Zhang, M. Wu, J. Guo, C. Nam // *Journal of Hazardous Materials*. – 2021. – Vol. 419. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2021.126485.
9. Hakeim O.A., Abdelghaffar F., El-Gabry K.L. Investigation of Egyptian *Chorisia* spp. fiber as a natural sorbent for oil spill cleanup // *Environmental Technology & Innovation*. – 2022. – Vol. 25. DOI: 10.1016/j.eti.2021.102134.
10. El Gheriany A.I. et al. Oil spill sorption capacity of raw and thermally modified orange peel waste // *Alexandria Engineering Journal*. – 2020. – Vol. 59. – P. 925–932. DOI: 10.1016/j.aej.2020.03.024.
11. Akpomie K.G. et al. Natural aluminosilicate clay obtained from south-eastern Nigeria as potential sorbent for oil spill remediation // *Journal of African Earth Sciences*. – 2019. – Vol. 155. – P. 118–123. DOI: 10.1016/j.jepe.2011.06.002.
12. Kovačević A. et al. Non-woven sorbent based on recycled jute fibers for efficient oil spill clean-up: from production to biodegradation // *Environmental Technology & Innovation*. – 2023. – Vol. 31. DOI: 10.1016/j.eti.2023.103170.
13. Zhang L., Sunny Jiang C., Yuntao G. Efficient removal of selenate in water by cationic poly(allyltrimethylammonium) grafted chitosan and biochar composite // *Environmental Research*. – 2021. – Vol. 194. DOI: 10.1016/j.envres.2020.110667.
14. Лебедев А.Б., Утков В.А., Халифа А.А. Использование спеченного сорбента для удаления сероводорода из отходящего промышленного газа при грануляции металлургических шлаков // *Записки Горного института*. – 2019. – Т. 237. – С. 292–297. DOI: 10.31897/pmi.2019.3.292
15. Герасимов А.М., Устинов И.Д., Зырянова О.В. Использование глиносодержащих отходов в качестве пуццолановых добавок // *Записки Горного института*. – 2023. – Т. 260. – С. 313–320. DOI: 10.31897/PMI.2023.33.
16. Application of the organic waste-based sorbent for the purification of aqueous solutions / O. Cheremisina, T. Litvinova, V. Sergeev, M. Ponomareva, J. Mashukova // *Water*. – 2021. – Vol. 13 (21). DOI: 10.3390/w13213101.
17. Fedeli R. et al. Foliar application of wood distillate boosts plant yield and nutritional parameters of chickpea // *Annals of Applied Biology*. – 2023. – Vol. 182. – P. 57–64. DOI: 10.1111/aab.12794.
18. Биоуголь: характеристики, применение влияние на почву и польза для растений. URL: <https://growtool.ru/blog/informatsiya/biochar-kharakteristiki-primenenie-polza-dlya-pochvy/> (дата обращения: 05.09.2023).
19. Созина И.Д., Данилов А.С. Микробиологическая ремедиация нефтезагрязнённых почв // *Записки Горного института*. – 2023. – Т. 260. – С. 297–312. DOI: 10.31897/PMI.2023.8.
20. Yutong L., Huiqing W., Yun L. An architectural exfoliated-graphene carbon aerogel with superhydrophobicity and efficient selectivity // *Materials & Design*. – 2019. – Vol. 184. DOI: 10.1016/j.matdes.2019.108134.
21. Recent advances in developing cellulosic sorbent materials for oil spill cleanup: a state-of-the-art review / S. Hammouda, Z. Chen, C. An, K. Lee // *Journal of Cleaner Production*. – 2021. – Vol. 311. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.127630.
22. Официальный сайт Wipo Patentscope. URL: <https://patentscope.wipo.int/search/ru/search.jsf> (дата обращения: 05.09.2023).
23. Cojocar C., Macoveanu M., Cretescu I. Peat-based sorbents for the removal of oil spills from water surface: application of artificial neural network modeling // *Colloids and Surfaces A-physicochemical and Engineering Aspects*. – 2011. – Vol. 384. – P. 675–684. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2011.05.036.
24. Васильева Ж.В., Васеха М.В., Тюляев В.С. Оценка эффективности сорбентов для реагирования на аварийные разливы нефти в арктической акватории // *Записки Горного института*. – 2023. – С. 1–9. DOI: 10.31897/PMI.2023.14.
25. Смолий В.А., Яценко Е.А., Косарев А.С. Исследование свойств опытных образцов ячеистых теплоизоляционных строительных стекломатериалов // *Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Серия: Технические науки*. – 2016. – № 4 (192). DOI: 10.17213/0321-2653-2016-4-103-109.

26. Xiao W. et al. Fabrication of foam-like oil sorbent from polylactic acid and Calotropis gigantea fiber for effective oil absorption // *Journal of Cleaner Production*. – 2021. – Vol. 278. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.123507.
27. Gharehasanloo M., Anbia M., Yazdi F. Preparation of superhydrophobic, green, and eco-friendly modified polylactic acid foams for separation oil from water // *International journal of biological macromolecules*. – 2023. – Vol. 240. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2023.124159.
28. Li D. et al. High-expansion open-cell polylactide foams prepared by microcellular foaming based on stereocomplexation mechanism with outstanding oil–water separation // *Polymers*. – 2023. – Vol. 15 (9). DOI: 10.3390/polym15091984.
29. Гольцман Б.М. Анализ вспенивающей активности различных видов порообразователей при синтезе пеностекла // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2020. – Т. 331. – № 12. – С. 173–179. DOI: 10.18799/24131830/2020/12/2950.
30. Исследование структуры пористых стеклокомпозитов на основе природного силикатного сырья ростовской области / Л.А. Яценко, Б.М. Гольцман, Е.А. Яценко, С.В. Трофимов, В.С. Яценко // *Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Серия: Технические науки*. – 2022. – № 3 (215). – С. 34–39.
31. Исследование динамики формирования пористой структуры пеностеклянных материалов / Б.М. Гольцман, Е.А. Яценко, Н.С. Гольцман, В.С. Яценко // *Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Серия: Технические науки*. – 2022. – № 2 (214). – С. 34–39.
32. Собянина Д.О. Неорганический нефтесорбент на основе фосфатного пеностекла системы $K_2O-(Mg,Ca)O-P_2O_5$: дис. ... канд. техн. наук. – СПб, 2022. – 133 с.
33. Superhydrophobic and super-oleophilic natural sponge sorbent for crude oil/water separation / M.K. Heidari, M. Fouladi, H.A. Sooreh, O. Tavakoli // *Journal of Water Process Engineering*. – 2022. – Vol. 48. DOI: 10.1016/j.jwpe.2022.102783
34. Palantavida S., Peng B., Sokolov I. Absorption of organic compounds by mesoporous silica discoids // *Microporous and Mesoporous Materials*. – 2020. – Vol. 306. DOI: 10.1016/j.micromeso.2020.110379.
35. Карнаухов А.П. Адсорбция. Текстура дисперсных и пористых материалов. – Новосибирск: Наука. Сиб. Предприятие РАН, 1999. – 470 с.
36. Разработка состава и исследование свойств сорбента на основе сапонита / О.С. Зубкова, И.Н. Пягай, К.А. Панкратьева, М.А. Торопчина // *Записки Горного института*. – 2023. – Т. 259. – С. 21–29. DOI: 10.31897/PMI.2023.1.
37. Антошкина Е.Г., Смолко В.А. Определение кислотно-основных центров на поверхности зерен кварцевых песков некоторых месторождений России // *Вестник ЮУрГУ. Серия: Математика. Механика. Физика*. – 2008. – № 7. – С. 65–68.
38. Пахнутова Е.А., Слизов Ю.Г. Синтез и исследование кислотно - основных центров и хроматографических свойств силохрома С-120 с привитыми слоями ацетилацетонатов переходных металлов // *Журнал неорганические материалы*. – 2015. – Т. 51. – № 6. – С. 634–639. DOI: 10.7868/S0002337X15050127.
39. Recycling of spent adsorbents for oxyanions and heavy metal ions in the production of ceramics / B. Verbinnen, C. Block, J. Caneghem, C. Vandecasteele // *Waste management*. – 2015. – Vol. 45. – P. 407–411. DOI: 10.1016/j.wasman.2015.07.006.
40. Acid-base properties of the surface of porous silicate sorbents of different morphologies and compositions / Y.A. Alikina, E.Y. Brazovskaya, N.M. Vasilenko et al. // *Glass Phys Chem*. – 2022. – Vol. 48. – P. 314–318. DOI: 10.1134/S1087659622040022.
41. Velepini T. et al. Heavy-metal spent adsorbents reuse in catalytic, energy and forensic applications – a new approach in reducing secondary pollution associated with adsorption // *Results in Chemistry*. – 2023. – Vol. 5. DOI: 10.1016/j.rechem.2023.100901.
42. Денисова О.В., Карапетян К.Г. Особенности получения биосорбентов на основе пеностекла с покрытиями монослойного характера // *Нанозифика и Наноматериалы: Сборник научных трудов Международного семинара*. – СПб, 25–26 ноября 2020. – СПб: Санкт-Петербургский горный университет, 2020. – С. 95–101.
43. Kogan V.E., Shakhparonova T.S., Sobianina D.O. Specificity of the kinetics of oil absorption by sorbents based on phosphorus-containing foam glasses // *18th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2018*. – Albena, Bulgaria, 2–8 July, 2018. – Vol. 18. – Iss. 5. – P. 831–836. DOI: 10.5593/sgem2018/5.1/S20.107.

Информация об авторах

Кирилл Гарегинович Карапетян, доктор технических наук, заведующий кафедрой химических технологий и переработки энергоносителей, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Россия, 199106, г. Санкт-Петербург, 21 линия В.О., 2. Karapetyan_KG@pers.spmi.ru

Инна Васильевна Дорош, аспирант кафедры химических технологий и переработки энергоносителей, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Россия, 199106, г. Санкт-Петербург, 21 линия В.О., 2. inna.doroshv@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0116-9898>

Пётр Владимирович Згонник, кандидат химических наук, доцент кафедры общей и физической химии, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Россия, 199106, г. Санкт-Петербург, 21 линия В.О., 2. zgonnik@spmi.ru

Александр Дмитриевич Коршунов, аспирант кафедры химических технологий и переработки энергоносителей, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Россия, 199106, г. Санкт-Петербург, 21 линия В.О., 2. korshunov-a-d@mail.ru

Анастасия Ивановна Перина, кандидат химических наук, доцент кафедры химических технологий и переработки энергоносителей, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Россия, 199106, г. Санкт-Петербург, 21 линия В.О., 2. Perina_AI@pers.spmi.ru

Поступила в редакцию: 30.11.2023

Поступила после рецензирования: 02.02.2024

Принята к публикации: 19.06.2024

REFERENCES

1. Fetisov V., Pshenin V., Nagornov D.Y., Lykov A., Mohammadi H. Evaluation of pollutant emissions into the atmosphere during the loading of hydrocarbons in marine oil tankers in the arctic region. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2020, vol. 8, pp. 1–11. DOI: 10.3390/jmse8110917.
2. Nafikova E., Alexandrov D., Platonova A., Gayanova K., Chuvashaeva K. Depletion of the floodplain-channel complex of the river (Belaya River, Republic of Bashkortostan). *E3S Web Conf.*, 2021, vol. 244, pp. 7. DOI: 10.1051/e3sconf/202124401012.
3. Huang K., Diao Z., Lu G. Advances in remediation of contaminated sites. *Processes*, 2023, vol. 11 (1). DOI: 10.3390/pr11010157.
4. Korelskiy D.S., Strizhenok A.V., Ismailova D.V. Development and justification of the method of biotechnological reclaiming of oil-contaminated land. *ARP Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2020, vol. 15, pp. 342–353.
5. Litvinova T.E., Suchkov D.V. Comprehensive approach to the utilisation of technogenic waste from the mineral resource complex. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.*, 2022, no. 6-1, pp. 331–348. (In Russ.) DOI: 10.25018/0236_1493_2022_61_0_331
6. Dzhevaga N., Lobacheva O. Reduction in technogenic burden on the environment by flotation recovery of rare earth elements from diluted industrial solutions. *Applied Sciences*, 2021, vol. 11 (16). DOI: 10.3390/app11167452.
7. Matveeva V.A., Smirnov Y.D., Suchkov D.V. Industrial processing of phosphogypsum into organomineral fertilizer. *Environmental Geochemistry and Health*, 2022, vol. 44 (5), pp. 1605–1618. DOI: 10.1007/s10653-021-00988-x.
8. Kim H., Zhang G., Wu M., Guo J., Nam C. Highly efficient and recyclable polyolefin-based magnetic sorbent for oils and organic solvents spill cleanup. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, vol. 419. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2021.126485.
9. Hakeim O.A., Abdelghaffar F., El-Gabry L.K. Investigation of Egyptian Chorisia spp. fiber as a natural sorbent for oil spill cleanup. *Environmental Technology & Innovation*, 2022, vol. 25. DOI: 10.1016/j.eti.2021.102134.
10. El Gheriany I.A. Oil spill sorption capacity of raw and thermally modified orange peel waste. *Alexandria Engineering Journal*, 2020, vol. 59, pp. 925–932. DOI: 10.1016/j.aej.2020.03.024.
11. Akpomie K.G. Natural aluminosilicate clay obtained from south-eastern Nigeria as potential sorbent for oil spill remediation. *Journal of African Earth Sciences*, 2019, vol. 155, pp. 118–123. DOI: 10.1016/j.jepe.2011.06.002.
12. Kovačević A. Non-woven sorbent based on recycled jute fibers for efficient oil spill clean-up: from production to biodegradation. *Environmental Technology & Innovation*, 2023, vol. 31. DOI: 10.1016/j.eti.2023.103170.
13. Zhang L., Sunny Jiang C., Yuntao G. Efficient removal of selenate in water by cationic poly(allyltrimethylammonium) grafted chitosan and biochar composite. *Environmental Research*, 2021, vol. 194. DOI: 10.1016/j.envres.2020.110667.
14. Lebedev A.B., Utkov V.A., Khalifa A.A. Sintered sorbent utilization for H₂S removal from industrial flue gas in the process of smelter slag granulation. *Journal of Mining Institute*, 2019, vol. 237, pp. 292–297. (In Russ.) DOI: doi.org/10.31897/pmi.2019.3.292.
15. Gerasimov A.M., Ustinov I.D., Zyryanova O.V. Use of clay-containing waste as pozzolanic additives. *Journal of Mining Institute*, 2023, vol. 260, pp. 313–320. (In Russ.) DOI: 10.31897/PMI.2023.33.
16. Cheremisina O., Litvinova T., Sergeev V., Ponomareva M., Mashukova J. Application of the organic waste-based sorbent for the purification of aqueous solutions. *Water*, 2021, vol. 13 (21). DOI: 10.3390/w13213101.
17. Fedeli R. Foliar application of wood distillate boosts plant yield and nutritional parameters of chickpea. *Annals of Applied Biology*, 2023, vol. 182, pp. 57–64. DOI: 10.1111/aab.12794.
18. Biochar: characteristics, application, effect on soil and benefits for plants. (In Russ.) Available at: <https://growtool.ru/blog/informatsiya/biochar-kharakteristiki-primenenie-polza-dlya-pochvy> (accessed 5 September 2023).
19. Sozina I.D., Danilov A.S. Microbiological remediation of oil-contaminated soils. *Journal of Mining Institute*, 2023, vol. 260, pp. 297–312. (In Russ.) DOI: 10.31897/PMI.2023.8.
20. Yutong L., Huiqing W., Yun L. An architectural exfoliated-graphene carbon aerogel with superhydrophobicity and efficient selectivity. *Materials & Design*, 2019, vol. 184. DOI: 10.1016/j.matdes.2019.108134.
21. Hammouda S., Chen Z., An C., Lee K. Recent advances in developing cellulosic sorbent materials for oil spill cleanup: a state-of-the-art review. *Journal of Cleaner Production*, 2021, vol. 311. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.127630.
22. *Wipo Patentscope*. (In Russ.) Available at: <https://patentscope.wipo.int/search/ru/search.jsf> (accessed 5 September 2023).
23. Cojocaru C., Macoveanu M., Cretescu I. Peat-based sorbents for the removal of oil spills from water surface: application of artificial neural network modeling. *Colloids and Surfaces A-physicochemical and Engineering Aspects*, 2011, vol. 384, pp. 675–684. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2011.05.036.
24. Vasilyeva J.V., Vasekha M.V., Tyulyaev V.S. Evaluation of the efficiency of sorbents for accidental oil spill response in the Arctic water. *Journal of Mining Institute*, 2023, pp. 1–9. (In Russ.) DOI: 10.31897/PMI.2023.14.
25. Smolij V.A., Yatsenko E.A., Kosarev A. S. Investigation of the properties prototypes of cellular thermal insulation of building glass materials. *Bulletin of higher educational institutions. North Caucasus region. Technical sciences*, 2016, no. 4 (192). (In Russ.) DOI: 10.17213/0321-2653-2016-4-103-109.
26. Xiao W. Fabrication of foam-like oil sorbent from polylactic acid and Calotropis gigantea fiber for effective oil absorption. *Journal of Cleaner Production*, 2021, vol. 278. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.123507.
27. Gharehasanloo M., Anbia M., Yazdi F. Preparation of superhydrophobic, green, and eco-friendly modified polylactic acid foams for separation oil from water. *International journal of biological macromolecules*, 2023, vol. 240. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2023.124159.
28. Li D. High-expansion open-cell polylactide foams prepared by microcellular foaming based on stereocomplexation mechanism with outstanding oil–water separation. *Polymers*, 2023, vol. 15 (9). DOI: 10.3390/polym15091984.

29. Goltsman B.M. Analysis of foaming activity of different types of foaming agents in foam glass synthesis. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 12, pp. 173–179. (In Russ.) DOI: 10.18799/24131830/2020/12/2950.
30. Yatsenko L.A. Study of the structure of porous glass-composites based on natural silicate raw materials of the Rostov region. *Bulletin of higher educational institutions. North Caucasus region. Technical sciences*, 2022, no. 4 (215), pp. 34–39. (In Russ.)
31. Goltsman B.M. Study of the formation dynamics of foam glass materials porous structure. *Bulletin of higher educational institutions. North Caucasus region. Technical sciences*, 2022, no. 2 (214), pp. 34–39. (In Russ.)
32. Sobyannina D.O. *Inorganic oil sorbent based on phosphate foam glass of the $K_2O-(Mg, Ca)O-P_2O_5$ system*. Cand. Diss. St Petersburg, 2022. 133 p. (In Russ.)
33. Heidari M.K., Fouladi M., Sooreh H.A., Tavakoli O. Superhydrophobic and super-oleophilic natural sponge sorbent for crude oil/water separation. *Journal of Water Process Engineering*, 2022, vol. 48. DOI: 10.1016/j.jwpe.2022.102783.
34. Palantavida S., Peng B., Sokolov I. Absorption of organic compounds by mesoporous silica discoids. *Microporous and Mesoporous Materials*, 2020, vol. 306. DOI: 10.1016/j.micromeso.2020.110379.
35. Karnaukhov A.P. *Adsorption. Texture of dispersed and porous materials*. Novosibirsk, Nauka Publ., 1999. 470 p. (In Russ.)
36. Zubkova O.S., Pyagay I.N., Pankratieva K.A., Toropchina M.A. Development of composition and study of sorbent properties based on saponite. *Journal of Mining Institute*, 2023, vol. 259, pp. 21–29. (In Russ.) DOI: 10.31897/PMI.2023.1.
37. Antoshkina E.G., Smolko V.A. Determination of acid-base centers on the surface of quartz sand grains from some Russian deposits. *Bulletin of SUSU. Series: Mathematics. Mechanics. Physics*, 2008, vol. 10, no. 7, pp. 65–68. (In Russ.)
38. Pakhnutova E.A., Slizhov Yu.G. Synthesis and study of acid-base centers and chromatographic properties of silochrome C-120 with grafted layers of transition. *Journal of Inorganic Materials*, 2015, vol. 51, no. 6, pp. 634–639. (In Russ.) DOI: 10.7868/S0002337X15050127.
39. Verbinen B., Block C., Caneghem J., Vandecasteele C. Recycling of spent adsorbents for oxyanions and heavy metal ions in the production of ceramics. *Waste management*, 2015, vol. 45, pp. 407–411. DOI: 10.1016/j.wasman.2015.07.006.
40. Alikina Y.A. Acid-base properties of the surface of porous silicate sorbents of different morphologies and compositions. *Glass Phys Chem*, 2022, vol. 48, pp. 314–318. DOI: 10.1134/S1087659622040022.
41. Velepini T. Heavy-metal spent adsorbents reuse in catalytic, energy and forensic applications- a new approach in reducing secondary pollution associated with adsorption. *Results in Chemistry*, 2023, vol. 5. DOI: 10.1016/j.rechem.2023.100901.
42. Denisova O.V., Karapetyan K.G. Features of obtaining biosorbents on the basis of foam glass with monolayer coatings. *Nanophysics and nanomaterials. Collection of scientific papers of the International Seminar*. St Petersburg, November 25–26, 2020. St Petersburg, St. Petersburg Mining University Publ., 2020. pp. 95–101. (In Russ.)
43. Kogan V.E., Shakhparonova T.S., Sobyannina D.O. Specificity of the kinetics of oil absorption by sorbents based on phosphorus-containing foam glasses. *18th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2018*. Bulgaria, Albena, July 2–8, 2018. Vol. 18 (5), pp. 831–836. DOI: 10.5593/sgem2018/5.1/S20.107.

Information about the authors

Kirill G. Karapetyan, Dr. Sc., Head of the Chemical Technologies and Energy Processing Department, Saint Petersburg Mining University, 2, 21st Line, St. Petersburg, 199106, Russian Federation. Karapetyan_KG@pers.spmi.ru

Inna V. Dorosh, Postgraduate Student, St. Petersburg Mining University, 2, 21st Line, Saint Petersburg Mining University, 199106, Russian Federation; inna.doroshv@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0116-9898>

Pyotr V. Zgonnik, Cand. Sc., Associate Professor, Saint Petersburg Mining University 2, 21st Line, St. Petersburg, 199106, Russian Federation. zgonnik@spmi.ru

Alexander D. Korshunov, Postgraduate Student, Saint Petersburg Mining University, 2, 21st Line, St. Petersburg, 199106, Russian Federation. korshunov-a-d@mail.ru

Anastasiya I. Perina, Cand. Sc., Associate Professor, Saint Petersburg Mining University, 2, 21st Line, St. Petersburg, 199106, Russian Federation. Perina_AI@pers.spmi.ru

Received: 30.11.2023

Revised: 02.02.2024

Accepted: 19.06.2024

УДК553.982.23

DOI: 10.18799/24131830/2024/8/4819

Шифр специальности ВАК: 1.6.11

Роль сейсмогеологического моделирования в атрибутном анализе данных сейсморазведки на примере прогноза толщин пласта Ю3т месторождения нефти юго-западного Казахстана

В.Б. Белозёров✉, А.А. Волкова

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск

✉BelozerovVB@hw.tpu.ru

Аннотация. *Актуальность* исследования заключается в необходимости внедрения в процесс атрибутной интерпретации данных сейсморазведки результатов двухмерного сейсмогеологического моделирования с целью выявления признаков проявления целевого объекта прогноза в волновом поле сейсмической записи и оценки влияния на него интерференции вмещающих толщ. **Объект:** высокопродуктивный терригенный верхнеюрский пласт Ю3т нижнекумкольской свиты месторождения нефти юго-западного Казахстана, сформированный в условиях жидкого пролювиального конуса выноса. **Цель:** оценка влияния интерференции вмещающих толщ верхнеюрского пласта Ю3т на сейсмогеологический прогноз его толщин в пределах рассматриваемого месторождения нефти. **Методы.** Двухмерное сейсмогеологическое моделирование, выполненное на основе анализа частотной характеристики и определения формы элементарного импульса сейсмической записи в интервале продуктивного пласта. Анализ толщины геологических неоднородностей, перекрывающих пласт Ю3т, с целью оценки их влияния на волновую характеристику временного интервала исследований. **Результаты.** Выполненное двухмерное сейсмогеологическое моделирование показало, что на амплитудную характеристику отрицательной фазы волнового пакета целевого объекта, характеризующую мощность пласта Ю3т, в различной степени оказывают влияние перекрывающий его пласт Ю3а и межрезервуарная покрывка Р1. По результатам моделирования сделаны выводы, что основой прогноза толщины пласта Ю3т следует считать карту атрибута разности амплитуд верхней положительной (А) и средней отрицательной (В) фаз рассматриваемого волнового пакета А, В, С. При этом корреляционные зависимости полученного атрибута со значениями толщины пласта Ю3т в пробуренных скважинах необходимо рассматривать в пределах участков вне зоны влияния других элементов, осложняющих волновую картину целевого объекта (тектонические нарушения и эрозионные выступы фундамента).

Ключевые слова: нижнекумкольская свита, двухмерное сейсмогеологическое моделирование, атрибутный анализ, сейсмический разрез, пролювиальный конус выноса, сейсмогеологический прогноз коллектора

Для цитирования: Белозёров В.Б., Волкова А.А. Роль сейсмогеологического моделирования в атрибутном анализе данных сейсморазведки на примере прогноза толщин пласта Ю3т месторождения нефти юго-западного Казахстана // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 8. – С. 241–249. DOI: 10.18799/24131830/2024/8/4819

UDC 553.982.23

DOI: 10.18799/24131830/2024/8/4819

Role of seismogeological modeling in the attribute analysis of seismic data using the example of the forecast of the thickness of the Yu3t formation of the southwestern Kazakhatsan oil field

V.B. Belozerov✉, A.A. Volkova

National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

✉BelozerovVB@hw.tpu.ru

Abstract. Relevance. The need to introduce the results of two-dimensional seismogeological modeling into seismic data attribute interpretation to identify signs of manifestation of the target object of the forecast in the wave field of seismic recording and assess the influence of interference of the host strata on it. **Object.** Highly productive terrigenous Upper Jurassic Yu3t formation of the Nizhnekumkol formation of the oil field of southwestern Kazakhstan, formed under conditions of a cone of liquid proluvial fan. **Aim.** To assess the impact of the interaction of the enclosing strata of the Upper Jurassic Yu3t formation on the seismogeological forecast of its capacities within the considered oil field. **Methods.** Two-dimensional seismogeological modeling based on the analysis of the frequency response and determination of the shape of the elementary pulse of seismic recording in the interval of the productive formation. Analysis of the thicknesses of geological inhomogeneities overlying the Yu3t formation in order to assess their effect on the wave characteristic of the time interval of research. **Results.** The performed two-dimensional seismogeological modeling showed that the amplitude characteristic of the negative phase of the wave packet of the target object, characterizing the power of the Yu3t formation, is affected to varying degrees by the overlapping thicknesses of the Yu3a formation and the inter-reservoir seal P1. Based on the modeling results, it was concluded that the basis for predicting the thickness of the Yu3t formation should be considered an attribute map of the difference in amplitudes of the upper positive (A) and average negative (B) phases of the considered wave packet A, B, C. At the same time, the correlation dependences of the obtained attribute with the values of the thickness of the Yu3t formation in drilled wells should be considered within the areas outside the zone the influence of other elements complicating the wave pattern of the target object (tectonic disturbances and erosive protrusions of the foundation).

Keywords: nizhnekumkolskaya suite, two-dimensional seismogeological modeling, attribute analysis, seismic section, proluvial cone of fan, seismogeological forecast of the reservoir

For citation: Belozerov V.B., Volkova A.A. Role of seismogeological modeling in the attribute analysis of seismic data using the example of the forecast of the thickness of the Yu3t formation of the southwestern Kazakhstans oil field. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 8, pp. 241–249. DOI: 10.18799/24131830/2024/8/4819

Введение

Существующие программные комплексы интерпретации сейсмических данных значительно расширили атрибутный спектр прогнозных параметров геологической среды. Наиболее распространёнными являются: спектральная декомпозиция [1–3], инверсионный анализ [4], когерентность [5], мгновенная частота [6], амплитудно-фазовый анализ [7–9] и другие.

В качестве основы для сейсмогеологической интерпретации используются временные разрезы, полученные после определённого графа обработки полевых сейсмических материалов [10].

Достоверность атрибутного прогноза целевого объекта зависит от качества обработки первичной информации, частотной характеристики сейсмического разреза и оценки влияния интерференции вмещающих целевой объект толщ на его волновую характеристику. При этом если две первых составляющих прогноза хорошо контролируются современными методами анализа сейсмической записи, то последняя (оценка влияния интерференции) при атрибутном анализе не рассматривается, что снижает качество сейсмогеологической интерпретации, а в ряде случаев приводит к ошибочному прогнозу.

Оценку влияния вмещающих толщ на интерференцию волновой характеристики целевого объекта наиболее целесообразно проводить на базе двухмерного сейсмогеологического моделирования [11–15]. Основа моделирования – анализ частотной характеристики сейсмической записи во временном окне целевого горизонта и особенность акустической

неоднородности тонкослоистой осадочной среды анализируемого интервала разреза. В качестве примера оценки влияния вмещающих толщ на волновую картину целевого объекта рассмотрен атрибутный прогноз толщины высокопродуктивного верхнеюрского пласта Ю3т месторождения нефти юго-западного Казахстана, формирование которого связано с жидким конусом выноса.

Геологические особенности строения верхнеюрского пласта Ю3т нижнекумкольской свиты

В тектоническом отношении анализируемое поднятие осложняет зону сочленения Аксайской горст-антиклинали и Акшабулакской грабен-синклинали, которые выделяются в пределах Южно-Торгайского нефтегазоносного бассейна Казахстана [16].

Основные запасы нефти рассматриваемого месторождения сосредоточены в верхнеюрском пласте Ю3т нижнекумкольской свиты [17].

Продуктивный коллектор залегает на метаморфических породах фундамента, представленных гнейсами, глинистыми сланцами и кварцитами [18, 19]. В литологическом отношении пласт слагают слабосцементированные песчаники преимущественно грубозернистого состава. Преобладание в составе цемента каолинита от 50 до 90 % указывает на континентальную обстановку осадконакопления. Отмечается бессистемное распределение крупных агрегатов кварца по разрезу пласта, что свидетельствует о его транспортировке совместно с более тонкозернистыми осадками (рис. 1, Г).

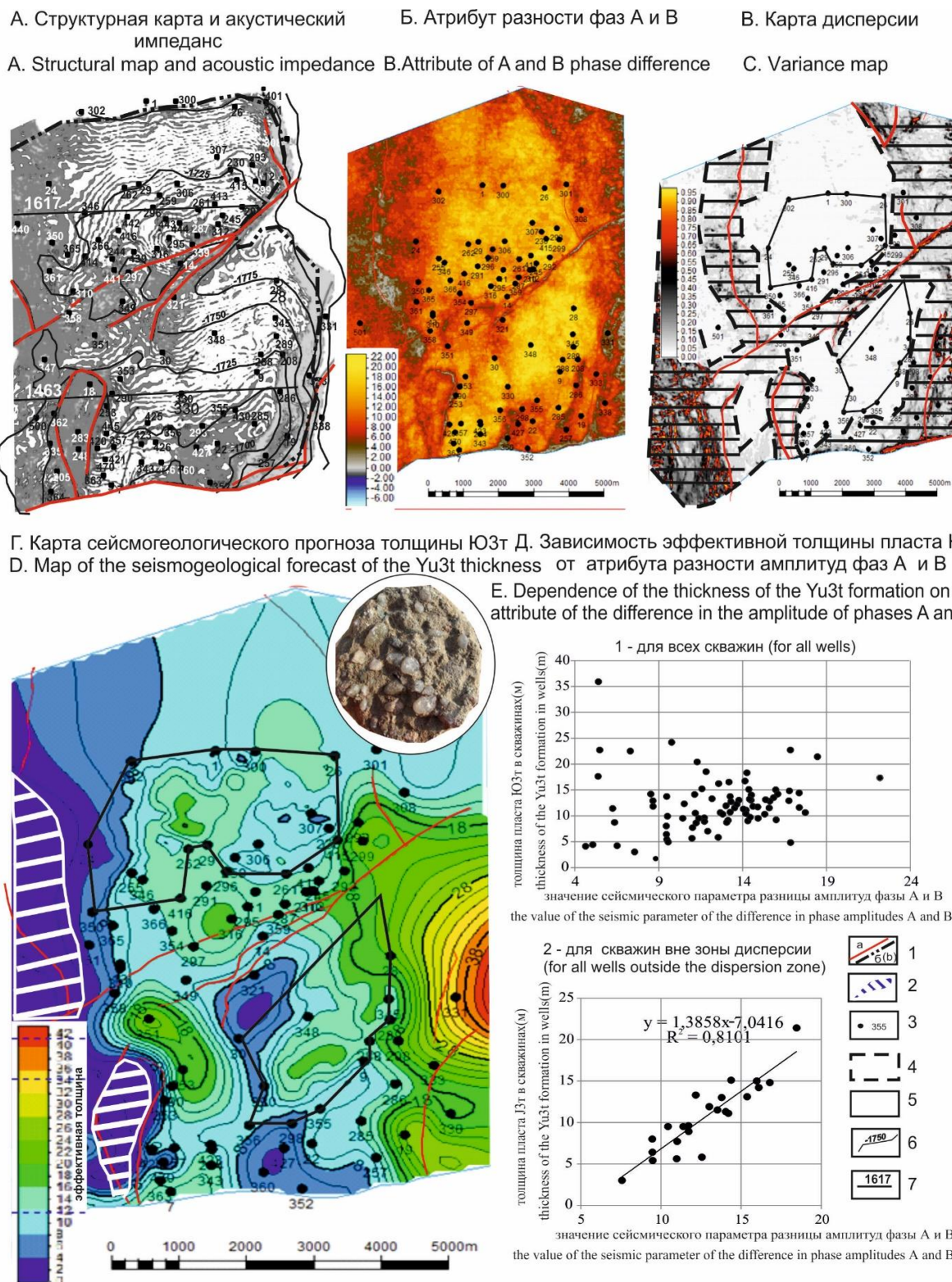
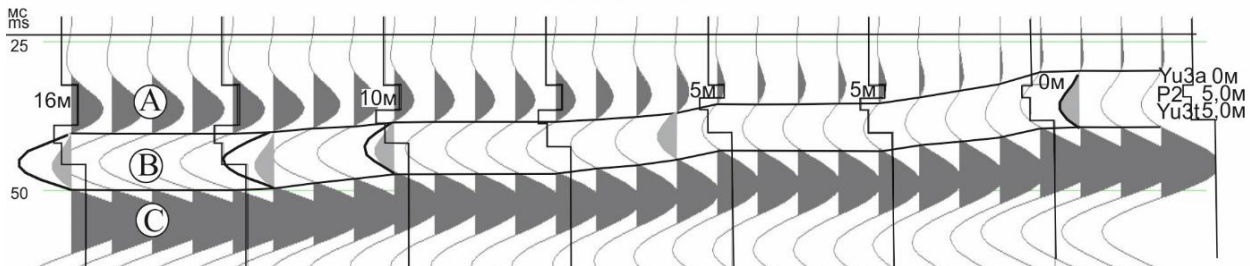


Рис. 1. Сейсмогеологический прогноз эффективной толщины пласта ЮЗт (1 – тектонические нарушения (а) и внешний контур нефтеносности (б); 2 – области выклинивания коллектора на эрозионную поверхность фундамента; 3 – скважины; 4 – тектоно-палеогеоморфологические зоны искажения динамики фазового пакета А–С; 5 – полигоны сейсмогеологического прогноза толщины пласта ЮЗт; 6 – изогипсы кровли пласта ЮЗт; 7 – сейсмический профиль)

Fig. 1. Seismogeological forecast of the effective thickness of the Yu3t formation (1 – tectonic disturbances (a) and the outer contour of the oil content (b); 2 – areas of reservoir wedging onto the erosive surface of the foundation; 3 – wells; 4 – tectonic-paleogeomorphological zones of distortion of the dynamics of the phase package A–C; 5 – polygons of seismogeological prediction of the thickness of the formation Yu3t; 6 – isohypses of the Yu3t formation roof; 7 – seismic profile)

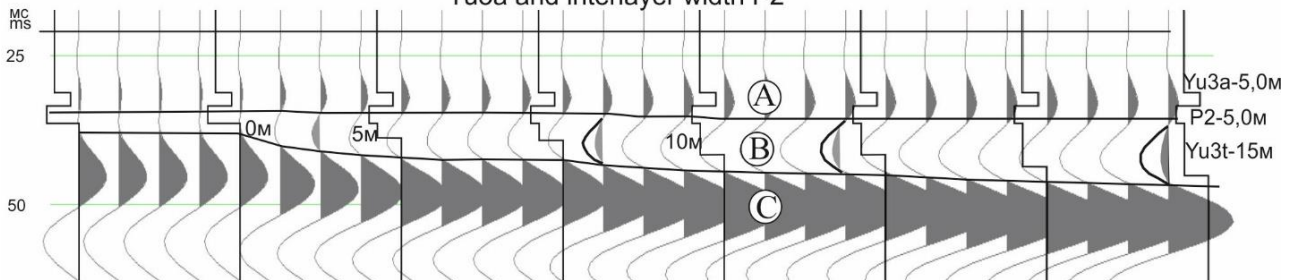
А. Изменение толщины пласта Ю3а от 16 до 0 м при постоянной мощности пласта Ю3т и межрезервуарной покрывки P2

A. Change in the thickness of the formation Yu3a from 16 to 0 m at a constant power of the formation Yu3t and interlayer width P2



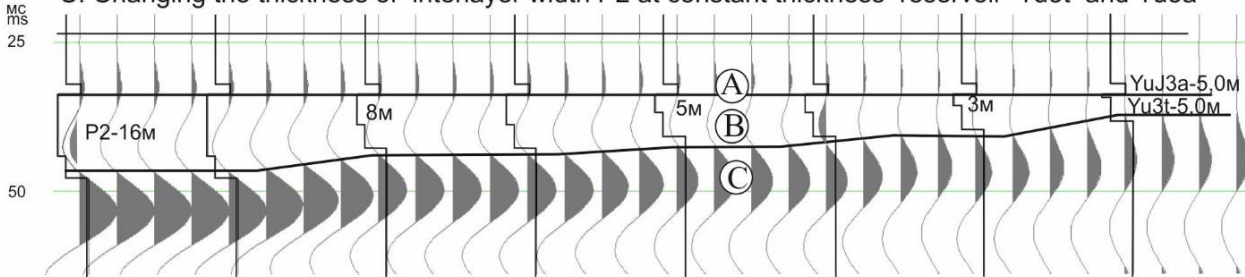
Б. Изменение толщины пласта Ю3т от 0 до 15 м при постоянной мощности пласта Ю3а и межрезервуарной покрывки P2

B. Change in the thickness of the Yu3t formation from 0 to 15 m at a constant thickness of the formation Yu3a and interlayer width P2



В. Изменение толщины межрезервуарной покрывки P2 при постоянной мощности пласта Ю3т и Ю3а

C. Changing the thickness of interlayer width P2 at constant thickness reservoir Yu3t and Yu3a



Г. Литолого-акустическая характеристика изучаемой части разреза

D. Lithological and acoustic characteristics of the studied part of the section

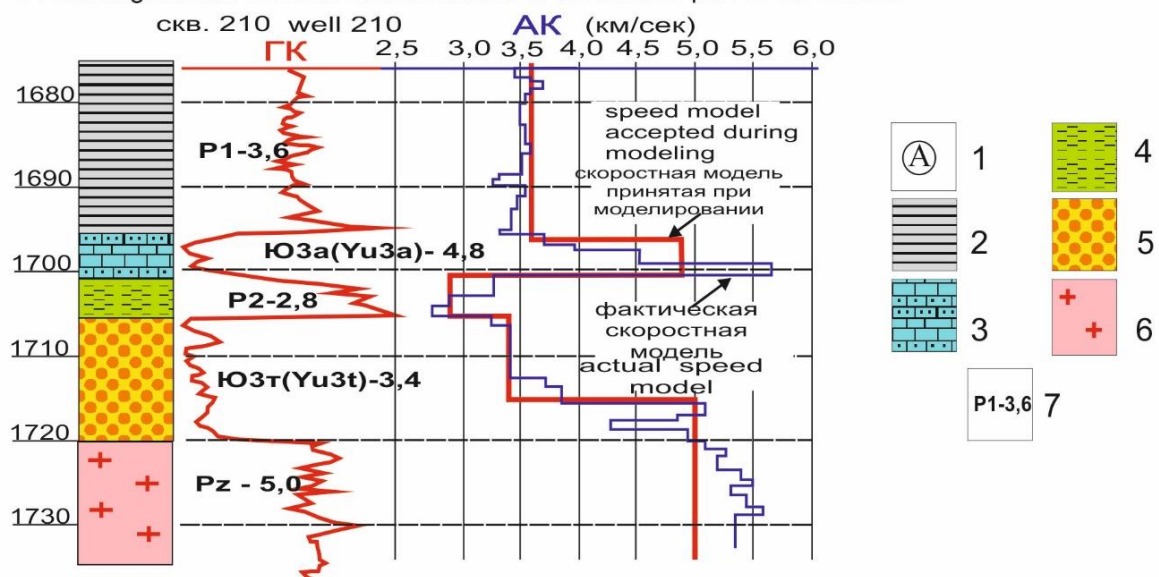


Рис. 2. Атрибутный прогноз толщины пласта Ю3т по результатам двухмерного сейсмогеологического моделирования (1 – фазы волнового пакета целевого объекта при двухмерном сейсмогеологическом моделировании; 2 – серые, тёмно-серые аргиллиты перекрывающей толщи; 3 – известняки, известковистые песчаники с прослоями кварцевых песчаников; 4 – серо-зелёные илистые пиритизированные глины; 5 – песчаники серые грубозернистые кварцевые слабоуплотнённые с включением кварцевой гальки; 6 – метаморфизованные породы фундамента (гранито-гнейсы); 7 – индекс литологической неоднородности и её скоростная характеристика, принятые при моделировании)

Fig. 2. Attribute forecast of Yu3t reservoir capacity based on the results of two-dimensional seismogeological modeling (1 – phases of the target object wave packet in two-dimensional seismogeological modeling; 2 – grey, dark grey mudstones of the overlying thickness; 3 – limestones, calcareous sandstones with interlayers of quartz sandstones; 4 – grey-green silty pyriticized clays; 5 – sandstones grey coarse-grained quartz slightly compacted with the inclusion of quartz pebbles; 6 – metamorphosed basement rock (granite-gneiss); 7 – index of lithological heterogeneity and its velocity characteristic adopted in modeling)

На диаграммах Пассеги основной массив данных гранулометрических исследований свидетельствует о формировании отложений в условиях активного заполнения канала и частично илистых стоков [20], что не противоречит модели пролювиально-аллювиального конуса выноса, формирование которого обусловлено наличием совокупности активных потоковых систем, изменяющих своё положение во времени и пространстве. На карте акустического импеданса пласта Ю3т это отмечается полосовидной системой пониженных и повышенных значений рассматриваемого параметра (рис. 1, А).

Близкая к прямолинейной конфигурация русловых потоков в сочетании с грубой сортировкой и слабой окатанностью кварцевых обломков характерна для жидких конусов выноса [21–24].

Несмотря на грубую сортировку обломочного материала, пласт обладает высокими фильтрационно-емкостными свойствами, что характерно для жидкого конуса выноса. Так, при значениях пористости от 16 до 18 % проницаемость может изменяться от 10 мД до 10 Дарси и более. Минимальные зоны толщин (до 2 м), осложнённые участками выклинивания коллектора на эрозионно-тектонические выступы, характерны для западной части структуры, а участки наращивания мощности свойственны центральной и восточной части поднятия. Нефтеносность пласта Ю3т контролируется как структурным планом, так и наличием литологических экранов и тектонических нарушений северо-восточной ориентировки.

Сейсмогеологическое моделирование

Сейсмогеологическое моделирование (одномерное и двухмерное) базируется на формировании априорной акустической модели анализируемого интервала разреза и подборе стандартного элементарного импульса (например, импульса Берлаги или Рикера), параметры которого могли бы соответствовать или быть близкими реальному импульсу.

В основу построения априорной акустической модели положены конкретные скоростные характеристики анализируемого интервала разреза по

скважинам (рис. 2, Г). В кровле интервала выделяется значительная по мощности (60 и более метров) толща серых, тёмно-серых аргиллитов (P1). Ниже следует пласт Ю3а, сложенный известняками и известковистыми песчаниками, далее – межрезервуарная покрышка P2, представленная серо-зелёными илистыми пиритизированными аргиллитами, затем продуктивный коллектор Ю3т – грубозернистый слабоуплотнённый песчаник, и завершает интервал толща метаморфизованных пород фундамента (Pz). Скоростная характеристика рассматриваемых толщ была осреднена и получила следующие значения: толща P1 – 3,6 км/с, пласт Ю3а – 4,8 км/с, покрышки P2 – 2,8 км/с, пласт Ю3т – 3,4 км/с, породы фундамента (Bas) – 5,0 км/с (рис. 2, Г).

Далее на участках временных разрезов, где расположены пробуренные скважины, в программном продукте SPS-PC (полевой обрабатывающий пакет сейсмической информации) определялся реальный элементарный импульс во временном окне анализируемого интервала, его спектральная и частотная характеристики (рис. 3).

В соответствии с частотной характеристикой реального импульса формировался модельный импульс, параметры которого представлены на рис. 3. На основе полученного импульса и осреднённой акустической модели рассматриваемого интервала разреза в скважинах проводилось одномерное моделирование.

В последующем полученная при одномерном моделировании синтетическая трасса сопоставлялась с реальным сейсмическим разрезом. Выполнялся анализ идентичности временных интервалов между фазами отражения на синтетических трассах и реальных сейсмотрассах разреза, и проводилось фазовое сопоставление модельной и реальной трассы (рис. 3, инлайн 1617 – скв. 346 и инлайн 1463 – скв. 330).

Исходя из анализа проведённого сопоставления можно сделать вывод, что информация строения пласта Ю3а отражается в положительной фазе А, пласта P2 и Ю3т – в отрицательной фазе В, а пород фундамента – в фазе С волнового пакета ABC.

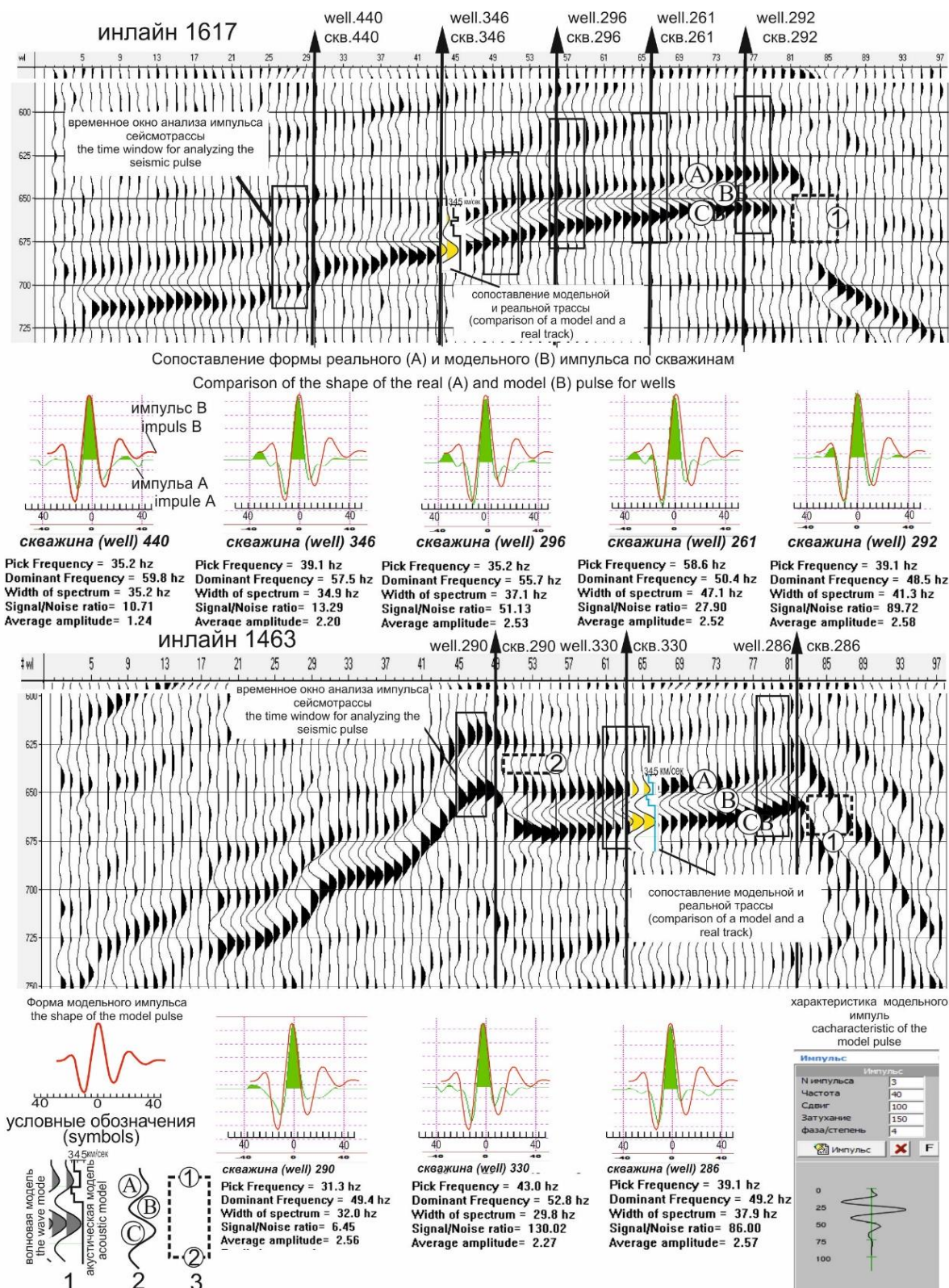


Рис. 3. Импульсная характеристика целевого объекта по сейсмическим разрезам инлайн 1463 и 1617 в районе скважин (1 – модельный волновой пакет анализируемого интервала разреза; 2 – обозначение фаз волнового пакета; 3 – зоны влияния на динамику волнового пакета пласта Ю3т тектонических нарушений (1) и эрозионных останцов фундамента (2))

Fig. 3. Impulse response of the target object according to seismic sections of inlines 1463 and 1617 in the borehole area (1 – model wave packet of the analyzed section interval; 2 – designation of the phases of the wave packet; 3 – zones of influence of tectonic disturbances (1) and erosive remnants of the foundation (2) on the dynamics of the wave packet of the Yu3t formation)

В соответствии с данными бурения по скважинам толщина пласта Ю3а в пределах месторождения изменяется от 0 до 15 м, покрышки Р2 от 1 до 16 м и пласта Ю3т – от 0 до 36 м.

Двухмерное сейсмогеологическое моделирование с целью оценки формы и динамики волнового пакета АБВ было выполнено при следующих параметрах анализируемого интервала разреза:

- 1) постоянных толщинах пласта Ю3т (5 м) и межрезервуарной покрышки Р2 (5 м), мощность пласта Ю3а изменяется от 0 до 16 м (рис. 2, А);
- 2) постоянных толщинах пласта Ю3а (5 м) и межрезервуарной покрышки Р2 (5 м), мощность пласта Ю3т изменяется от 0 до 15 м (рис. 2, Б);
- 3) постоянных толщинах пластов Ю3а (5 м) и Ю3т (5 м), мощность межрезервуарной покрышки Р2 изменяется от 1 до 16 м (рис. 2, В).

Как следует из рис. 2, Б, для прогноза толщин пласта Ю3т можно анализировать как динамику выделяемой фазы В, так и временной интервал между фазами А и С. Однако для однозначного прогноза толщин пласта Ю3т по данным сейсморазведки предпочтителен анализ динамики фазы В с учётом влияния на неё фазы А, увеличение которой пропорционально усиливает и фазу В (рис. 2, А).

Связано это с тем, что с возрастанием толщины пласта Ю3т увеличивается как амплитуда фазы В, так и межфазовый временной интервал А–С (рис. 2, В). В то же время расширение межфазового временного интервала А–С отмечается и в случае изменения толщин покрышки Р2 (рис. 2, В), что приводит к неоднозначности прогноза толщины пласта Ю3т по анализу временного интервала фаз А–С.

При этом, рассматривая амплитудный фактор фазы В, можно отметить, что изменение толщины покрышки Р2 слабо отражается на изменении её амплитуды (рис. 2, В).

Вследствие этого более точный прогноз толщины Ю3т можно осуществлять по амплитуде фазы В с учётом влияния на неё фазы А. Для этого из значения амплитуды фазы В необходимо вычесть абсолютное значение амплитуды фазы А. Результаты такого вычитания представлены на рис. 1, Б.

Результат

Рассматривая корреляционные зависимости полученного атрибута разности амплитуд фаз А и Б волнового пакета АВС с данными толщины пласта Ю3т в пробуренных скважинах (рис. 1, Д-1), следует отметить отсутствие корреляционной связи между рассматриваемым параметром и данными эффективных толщин пласта Ю3т в скважинах. Обусловлено это влиянием на интервально-динамическую выразительность сейсмических фаз АВС тектонических нарушений и крутопадающих склонов эрозионно-тектонической поверхности фундамента. Достаточно хорошо элементы тектонической неодно-

родности отражаются в атрибуте «дисперсия» по кровле пласта Ю3т (рис. 1, В), что позволяет территориально ограничить область сейсмогеологической интерпретации и выделить участки (полигоны), где влияние дисперсии минимально.

Выполненное сопоставление рассчитанного атрибута разности амплитуды фазы А и В со значениями эффективных толщин пласта Ю3т по скважинам выделенных полигонов показало хорошую корреляционную зависимость (рис. 1, Д-2).

Прогноз толщины пласта по данным сейсморазведки проводился в пределах северного и южного полигонов, для которых отмечается низкая плотность эксплуатационного бурения и сокращённые толщины пласта Ю3т по данным интерполяции пробуренных скважин.

Как следует из карты (рис. 1, Г), при интерполяции эффективной мощности пласта по скважинам она в пределах южного и северного полигонов может составить 5–8 м. На основе данных сейсмогеологического прогноза на полигонах выделяются зоны увеличения эффективной толщины продуктивного коллектора до 18 м, что позволяет оптимизировать фонд эксплуатационного бурения с целью увеличения добычи нефти на месторождении.

Выводы

1. Выполненное двухмерное сейсмогеологическое моделирование показало, что на амплитудную характеристику отрицательной фазы волнового пакета целевого объекта, характеризующую эффективную мощность пласта Ю3т, в различной степени оказывают влияние перекрывающие его толщины пласта Ю3а и межрезервуарной покрышки Р1.
2. По результатам моделирования сделаны выводы, что основой прогноза толщины пласта Ю3т следует считать карту атрибута разности амплитуд верхней положительной (А) и средней отрицательной (В) фаз рассматриваемого волнового пакета АВС.
3. Корреляционные зависимости полученного атрибута со значениями эффективной толщины пласта Ю3т в пробуренных скважинах необходимо рассматривать в пределах участков (полигонов) вне зоны влияния других элементов, осложняющих волновую картину целевого объекта (тектонические нарушения и эрозионные выступы фундамента).
4. Зона влияния тектонических нарушений и эрозионных выступов фундамента определялась по атрибуту «дисперсия».
5. Прогноз эффективной толщины коллектора Ю3т по данным сейсморазведки, выполненный в пределах северного и южного полигонов, для которых отмечаются сокращённые мощности пласта по данным пробуренных скважин (5–8 м), показал её увеличение до 18 м, что позволяет оптимизировать фонд эксплуатационного бурения с целью увеличения добычи нефти на месторождении.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Use of spectral decomposition technique for delineation of channels at Solar gas discovery, offshore West Nile Delta, Egypt / A. Adel, A. Othmana, M. Fathya, A. Maherb // *Egyptian Journal of Petroleum*. – 2016. – № 25. – P. 45–51.
2. Rodriguez J.M. Spectral decomposition and inversion: case study of a production area in the cook inlet basin Alaska, USA. Thesis. – Houston, 2009. – 89 p.
3. Johann P., Ragagnin G., Spinola M. Spectral decomposition reveals geological hidden features in the amplitude maps from a deep water reservoir in the Campos Basin // *SEG*. – Dallas, 2003. – P. 1740–1743.
4. Chopra S., Pickford S. Integrating coherence cube imaging and seismic attributes // *SEG*. – Calgary, 2001. – P. 20–22.
5. Shtivelman V., Land E., Gelchinsky B. Phase and group time section and possibilities for their use in seismic interpretation of complex media // *Geophysical Prospecting*. – 1986. – Vol. 34. – № 4. – P. 508–536.
6. Seismic attribute benchmarking on instantaneous frequency / L Xing, V. Aarre, A.E. Barnes, T. Theoharis, N. Salman, E. Tjaland // *GEOPHYSICS*. – 2019. – Vol. 84. – № 3. – P. 63–75.
7. Unyithya J.M., Ehirim C.N., Dagogo T. Seismic amplitudes and spectral attribute analysis in reservoir characterisation, 'MUN' onshore Niger delta field // *Petrol Explor Prod Technol*. – 2020. – № 10. – P. 2257–2267.
8. Kidney R.L., Silver R.S., Hussein H.A. 3-D seismic mapping and amplitude analysis: A Gulf of Mexico case history // *Energy Exploration & Exploitation*. – 1992. – Vol. 10. – № 4/5. – P. 259–280.
9. Li S., Rao Y. Seismic low-frequency amplitude analysis for identifying gas reservoirs within thinly layered media // *Journal of Geophysics and Engineering*. – 2020. – Vol. 17. – № 1. – P. 175–188.
10. Al-Rahim A.M., Terky L.F. Processing seismic data with open source software // *International Journal of Advanced Engineering Research and Science (IJAERS)*. – 2017. – Vol. 4. – № 10. – P. 181–188.
11. Конторович В.А. Моделирование волновых полей для решения задачи прогнозирования верхнеюрского разреза юга Западной Сибири // *Геология нефти и газа*. – 1992. – № 11. – С. 9–22.
12. Белозеров В.В. Структурно-литологические ловушки нефти и газа в отложениях верхней юры Среднеасио-каспийского мегабассейна // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2023. – Т. 334. – № 9. – С. 137–145.
13. Вероятностное сейсмогеологическое моделирование пласта как инструмент прогноза точности структурных построений и атрибутивного анализа (на примере месторождений Западной Сибири) / Д.Е. Мирошников, И.Н. Керусов, А.П. Титов, Ю.В. Михеев, М.А. Аксенов, Д.В. Исаков // *Геомодель 2008: 10-я научно-прикладная конференция EAGE по геологоразведке и разработке месторождений нефти и газа*. – Геленжик, сентябрь 2008. – С. 94–140.
14. Бобров А.В., Белозеров В.В. Литолого-фациальная характеристика пласта Ю1/3 в районе южной периклинали Каймысовского свода на основе комплексирования данных сейсморазведки 3D и бурения // *Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений*. – 2019. – № 8 (332). – С. 56–61.
15. Немова В.Д., Бордюг В.Д., Ревко А.В. Сейсмогеологическое моделирование изменения свойств отложений баженской свиты в межскважинном пространстве // *Технология и сейсморазведка*. – 2013. – № 2. – С. 72–79.
16. Южно-Тургайский осадочный бассейн – вещественный состав и нефтегазоносность домезозойских образований / Т.Х. Парагульгов, Х.Х. Парагульгов, Е.М. Фазылов, Э.С. Мусина // *Известия НАН РК. Сер. геол.* – 2013. – № 1. – С. 44–55.
17. Petroleum geology and deposits in the Arys-kum depression Turgai Ridge / Z. Tian, Z. Xu, J. Zheng, J. Zhao // *Xinjiang Petroleum. Geol.* – 2010. – Vol. 31. – P. 108–109.
18. Белозеров В.В., Коровин М.О. Высокопроницаемые верхнеюрские коллектора пролювиально-аллювиальных конусов выноса месторождений нефти восточного Казахстана // *Новые вызовы фундаментальной и прикладной геологии нефти и газа – XXI век: Всероссийская научная конференция с участием иностранных ученых к 150-летию академика АН СССР И.М. Губкина и 110-летию академика АН СССР и РАН А.А. Трофимука*. – Новосибирск, 2021. – С. 192–195.
19. Регулировка разработки III объекта месторождения Акшабулак центральный / Б. Шиланбаев, К. Гиземанн, Т. Джаксылыков, М. Колдей, Н. Прмаганбеков, М. Мустафаев // *Нефть и газ*. – 2021. – № 3 – С. 81–91.
20. Седиментология / Р. Градзинский, А. Костецкая, А. Радомский и др. // пер. с польского. – М.: Недра, 1980. – С. 430–434.
21. Лидер М.Р. Седиментология / пер. с англ. – М.: Мир, 1980. – С. 176–182.
22. Селли Р.Ч. Древние обстановки осадконакопления // пер. с англ. – М.: Недра, 1989. – 293 с.
23. Рединг Х. Обстановки накопления и фации // пер. с англ. – М.: Мир, 1977. – Т. 1. – С. 44–50.
24. Рейнек Г.Э., Сингх И.Б. Обстановка терригенного осадконакопления / пер. с англ. – М.: Недра, 1981. – С. 243–247.

Информация об авторах

Владимир Борисович Белозеров, доктор геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией геологии, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. BelozerovVB@hw.tpu.ru

Александра Александровна Волкова, инженер лаборатории геологии месторождений нефти и газа, старший преподаватель отделения нефтегазового дела, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. volkovaa@tpu.ru

Поступила в редакцию: 03.06.2024

Поступила после рецензирования: 21.06.2024

Принята к публикации: 09.07.2024

REFERENCES

1. Adel A., Othmana A., Fathya M., Maherb A. Use of spectral decomposition technique for delineation of channels at Solar gas discovery offshore West Nile Delta. Egypt. *Egyptian Journal of Petroleum*, 2016, no. 25, pp. 45–51.
2. Rodriguez J.M. *Spectral decomposition and inversion: case study of a production area in the cook inlet basin Alaska. USA*. Thesis. Houston, 2009. 89 p.
3. Johann P., Ragagnin G., Spinola M. Spectral decomposition reveals geological hidden features in the amplitude maps from a deep water reservoir in the Campos Basin. *SEG*. Dallas, 2003. pp. 1740–1743.
4. Chopra S., Pickford S. Integrating coherence cube imaging and seismic attributes. *SEG*. Calgary, 2001. pp. 20–22.
5. Shtivelman V., Land E., Gelchinsky B. Phase and group time section and possibilities for their use in seismic interpretation of complex media. *Geophysical Prospecting*, 1986, vol. 34, no. 4, pp. 508–536.
6. Xing L., Aarre V., Barnes A.E., Theoharis T., Salman N., Tjaland E. Seismic attribute benchmarking on instantaneous frequency. *GEOPHYSICS*, 2019, vol. 84, no. 3, pp. 63–75.
7. Unyithya J.M., Ehirim C.N., Dagogo T. Seismic amplitudes and spectral attribute analysis in reservoir characterisation. 'MUN' onshore Niger delta field. *Petrol Explor Prod Technol*, 2020, no. 10, pp. 2257–2267.
8. Kidney R.L., Silver R.S., Hussein H.A. 3-D seismic mapping and amplitude analysis: a Gulf of Mexico case history. *Energy Exploration & Exploitation*, 1992, vol. 10, no. 4, pp. 259–280.
9. Li S., Rao Y. Seismic low-frequency amplitude analysis for identifying gas reservoirs within thinly layered media. *Journal of Geophysics and Engineering*, 2020, vol. 17, no. 1, pp. 175–188.
10. Al-Rahim A.M., Terky L.F. Processing seismic data with open source software. *International Journal of Advanced Engineering Research and Science (IJAERS)*, 2017, vol. 4, no. 10, pp. 181–188.
11. Kontorovich V.A. Modeling of wave fields to solve the problem of forecasting the Upper Jurassic section of the south of Western Siberia. *Geology of oil and gas*, 1992, no. 11, pp. 9–22. (In Russ.)
12. Belozarov V.B. Structural and lithological traps of oil and gas in the Upper Jurassic sediments of the Middle Yugan megawall. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2023, vol. 334, no. 9, pp. 137–145. (In Russ.)
13. Miroshnichenko D.E., Kersov I.N., Titov A.P., Mikheev Yu.V., Aksenov M.A., Isakov D.V. Probabilistic seismicogeological modeling of the formation as a tool for predicting the accuracy of structural constructions and attributive analysis (using the example of deposits in Western Siberia). *Geomodel 2008. The 10th EAGE Scientific and Applied Conference on exploration and development of oil and gas fields*. Gelenzhik, September 2008. pp. 94–140. (In Russ.)
14. Bobrov A.V., Belozarov V.B. Lithological and facies characteristics of the Yu1/3 formation in the area of the southern periclinal of the Kaimys arch based on the integration of 3D seismic exploration and drilling data. *Geology, geophysics and development of oil and gas fields*, 2019, no. 8 (332), pp. 56–61. (In Russ.)
15. Nemova V.D., Bordyug V.D., Revko A.V. Seismicogeological modeling of changes in the properties of sediments of the Bazhenov formation in the interwell space. *Technology and seismic exploration*, 2013, no. 2, pp. 72–79. (In Russ.)
16. Paragulgov T.Kh., Paragulgov Kh.Kh., Fazylov E.M., Musina E.S. South Torgai sedimentary basin - material composition and oil and gas potential of pre-Mesozoic formations. *News NAN RK, Ser. Geol*, 2013, no. 1, pp. 44–55. (In Russ.)
17. Tian Z., Xu Z., Zheng J., Zhao J. Petroleum geology and Deposits in the Arysium depression Turgai Ridge. *Xinjiang Petroleum. Geol.*, 2010, vol. 31, pp. 108–109.
18. Belozarov V.B., Korovin M.O. Highly permeable Upper Jurassic reservoirs of the proluvial-alluvial cones of the outflow of oil fields in East Kazakhstan. *New challenges of fundamental and applied geology of oil and gas – XXI century. All-Russian scientific conference with the participation of foreign scientists to the 150th anniversary of Academician of the USSR Academy of Sciences I.M. Gubkin and 110th anniversary of Academician of the USSR Academy of Sciences and RAS A.A. Trofimuk*. Novosibirsk, 2021. pp. 192–195. (In Russ.)
19. Shilabayev B., Gizemann K., Dzhaksylykov T., Koldey M., Prmagambekov N., Mustafayev M. Regulation of the development of the III Akshabulak Central place of origin. *Oil and gas*, 2021, no. 3, pp. 81–91. (In Russ.)
20. Gradzinskiy R., Kostetskaya A., Radomskiy A. *Sedimentology*. Moscow, Nedra Publ., 1980. pp. 430–434. (In Russ.)
21. Lider M.R. *Sedimentology*. Translated from English. Moscow, Mir Publ., 1980. pp. 176–182. (In Russ.)
22. Selli R.Ch. *Ancient sedimentation environments*. Moscow, Nedra Publ., 1989. 293 p. (In Russ.)
23. Reding Kh. *Accumulation and facies environments*. Moscow, Mir Publ., 1977. Vol. 1, pp. 44–50. (In Russ.)
24. Reynek G.E., Singkh I.B. *Situation of terrigenous sedimentation*. Moscow, Nedra Publ., 1981. pp. 243–247. (In Russ.)

Information about the authors

Vladimir B. Belozarov, Dr. Sc., Head of the Laboratory of Geology, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 635050, Russian Federation. BelozarovVB@hw.tpu.ru

Alekandra A. Volkova, Engineer, Senior Lecturer, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 635050, Russian Federation. volkovaa@tpu.ru

Received: 03.06.2024

Revised: 21.06.2024

Accepted: 09.07.2024

Компьютерная верстка *О.Ю. Аршинова*
Корректura и перевод на английский язык *С.В. Жаркова*
Дизайн обложки *Т.В. Буланова*

Фотографии на обложке взяты из личного архива
Валерия Касаткина

Руководство для авторов и образец оформления статьи: izvestiya.tpu.ru

Подписано к печати 28.08.2024. Дата выхода журнала: 30.08.2024.
Формат 60x84/8. Бумага «Снегурочка».
Печать XEROX. Усл. печ. л. 29,08. Уч.-изд. л. 26,3.
Заказ 287-24. Тираж 500 экз. Цена свободная.



Издательство

ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Адрес учредителя, редакции, издателя, типографии:
634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, каб. 139.