

## ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

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

## ИЗВЕСТИЯ ТОМСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА ИНЖИНИРИНГ ГЕОРЕСУРСОВ

Том 336, № 5, 2025

Издательство Томского политехнического университета 2025

#### РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Семилетов И.П., гл. редактор, д-р геогр. наук (Россия) Оствальд Р.В., канд. хим. наук (Россия) Савичев О.Г., д-р геогр. наук (Россия) Покровский О.С., канд. геол.-минерал. наук (Франция) Старостенко В.И., д-р физ.-мат. наук (Украина) Конторович А.Э., д-р геол.-минерал. наук (Россия) Белозеров В.Б., д-р геол.-минерал. наук (Россия) Никитенков Н.Н., д-р физ.-мат. наук (Россия) Силкин В.М., д-р физ.-мат. наук (Испания) Коротеев Ю.М., д-р физ.-мат. наук (Россия) Уленеков 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) Алексеенко С.В., д-р физ.-мат. наук (Россия) Воропай Н.И., д-р техн. наук (Россия) Кочегуров А.И., канд. техн. наук (Россия) Руи Д., PhD (Португалия) Зиатдинов Р.А., канд. физ.-мат. наук (Южная Корея) Спицын В.Г., д-р техн. наук (Россия) Муравьев С.В., д-р техн. наук (Россия) Пойлов В.З., д-р техн. наук (Россия) Лотов В.А., д-р техн. наук (Россия) Софронов В.Л., д-р хим. наук (Россия) Бузник В.М., д-р хим. наук (Россия) Захаров Ю.А., д-р хим. наук (Россия) Антипенко В.Р., д-р хим. наук (Россия) Голик В.И., д-р техн. наук (Россия) Абуталипова Е.М., д-р техн. наук (Россия) Полищук В.И., д-р техн. наук (Россия) Хамитов Р.Н., д-р техн. наук (Россия) Зюзев А.М., д-р техн. наук (Россия) Третьяк А.Я., д-р техн. наук (Россия) Арбузов С.И., д-р геол.-минерал. наук (Россия) Ковалев В.З., д-р техн. наук (Россия) Романенко С.В., д-р хим. наук (Россия) Кирьянова Л.Г., канд. филос. наук (Россия) 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, 2025

#### 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



ISSN (print) – 2500\_1019 ISSN (on\_line) – 2413\_1830

## BULLETIN OF THE TOMSK POLYTECHNIC UNIVERSITY GEO ASSETS ENGINEERING

Volume 336, № 5, 2025

Tomsk Polytechnic University Publishing House 2025

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) Belozerov 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) Alekseenko 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.

© Tomsk Polytechnic University, 2025 www

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

#### СОДЕРЖАНИЕ

#### CONTENTS

- Изучение влияния наружных покрытий обсадных труб на качество сцепления цементного камня с обсадной колонной Прыкина Ю.В., Мельников М.М., Вагапова Ю.Ж., Предеин И.С., Губжоков В.Б., Закалашный А.В.
  - Разработка коллекции микрофлюидных чипов для изучения многофазных потоков в задачах нефтегазовой индустрии Якимов А.С., Мешкова В.Д., Гузей Д.В., Пряжников А.И., Минаков А.В.
  - Влияние конструкции коронок, армированных резцами PDC, на отбор керна в мерзлых породах Попова М.С., Григорьев Б.В.
- Влияния закачки промышленных жидких отходов на гидродинамические условия принимающего горизонта Гасумов Р.А., Гасумов Э.Р.
- Гидравлический расчёт трубопровода отгрузки крупнотоннажных заводов сжиженного природного газа Муниров Ш.М., Мельников В.Б.
- Комплексирование электроразведочных методов при поисках рудоконтролирующих структур в условиях Турунтаевской рудной зоны (Томская область) Заплавнова А.А., Оленченко В.В., Поспеева Е.В., Осипова П.С., Логутов Б.Б.
  - Assessment of water losses in internal water supply networks Sahakyan A.A.
- Формы миграции химических элементов в термальных водах Байкальской рифтовой зоны Домрочева Е.В., Зиппа Е.В.
- Экспериментальное выщелачивание рудоносных пород Дарасунского месторождения золота Эпова Е.С., Юргенсон Г.А., Еремин О.В.
  - The porosity and nuclear magnetic characteristics of artificial samples with the equal grain size Yanushenko T.A., Golikov N.A.
- Проблемы и основные направления развития геологоразведочных работ на нефть и газ в Югре (Ханты-Мансийский автономный округ) Кузьменков С.Г., Лобова Г.А., Нанишвили О.А., Новиков М.В., Захарова Л.М., Захарова В.А.
- Особенности эксплуатации массивной залежи нефти пласта М1 палеозойского фундамента Арчинской площади горизонтальным фондом скважин Белозеров В.Б., Овчаренко Д.М., Краснощёкова Л.А., Ужегова Ю.А.
  - Оценка притока подземных вод в Среднюю Обь и ее основные притоки Савичев О.Г.
  - Аутигенный пирит континентального склона моря Лаптевых: влияние разгрузки метансодержащих флюидов Рубан А.С., Рудмин М.А., Дударев О.В., Семилетов И.П.

- 7 Impact of external coatings of casing pipes on adhesion quality of «set cement - casing string» system
   Prykina Yu.V., Melnikov M.M., Vagapova Yu.Zh., Predein I.S., Gubzhokov V.B., Zakalashny A.V.
- 17 Development of a collection of microfluidic chips for studying multiphase flows in the oil and gas industry Yakimov A.S., Meshkova V.D., Guzey D.V., Pryazhnikov A.I., Minakov A.V.
- 29 Impact of the design of crowns reinforced with PDC cutters on core sampling in frozen rocks Popova M.S., Grigoriev B.V.
- 37 Impact of injection of industrial liquid waste on hydrodynamic conditions of receiving horizon Gasumov R.A., Gasumov E.R.
- 49 Hydraulic calculation for loading pipeline of large-scale liquified natural gas plants Munirov Sh.M., Melnikov V.B.
- 62 Combination of electrical exploration methods in searching for ore-controlling structures in the Turuntaevskaya ore zone (Tomsk region) Zaplavnova A.A., Olenchenko V.V., Pospeeva E.V., Osipova P.S., Logutov B.B.
- 76 Оценка потерь воды во внутренних сетях водоснабжения Саакян А.А.
- 85 Forms of migration of chemical elements in thermal waters of the Baikal rift zone Domrocheva E.V., Zippa E.V.
- **100 Experimental leaching of ore-bearing rocks of the Darasun gold deposit** Epova E.S., Yurgenson G.A., Eremin O.V.
- 110 Пористость и ядерно-магнитные характеристики искусственных образцов с одинаковым размером зерен Янушенко Т.А., Голиков Н.А.
- 120 Oil and gas exploration in Yugra (Khanty-Mansi autonomous okrug): issues and the main development directions Kuzmenkov S.G., Lobova G.A., Nanishvili O.A., Novikov M.V., Zakharova L.M., Zakharova V.A.
- **132** Features of exploiting massive oil reservoir of the M1 formation of the Paleozoic basement at the Archinskaya area by the horizontal wells Belozerov V.B., Ovcharenko D.M., Krasnoshchekova L.A., Uzhegova Yu.A.
- **144** Assessment of groundwater inflow into the Middle **Ob river and its main tributaries** Savichev O.G.
- 159 Authigenic pyrite from the Laptev Sea continental slope: the impact of methane seepage activity Ruban A.S., Rudmin M.A., Dudarev O.V., Semiletov I.P.

- Разработка методики уравновешивания балансирного станка-качалки с роторными
   174
   Develops

   противовесами и определение ее работоспособности в ходе натурного эксперимента Солодкий Е.М., Петроченков А.Б., Кривощеков С.Н., Сальников С.В., Вишняков Д.Д., Юдин Р.Ю.
   174
   Develops
  - Advantages of using transformers with high temperature superconducting windings at high frequency in mobile and autonomous power supply systems Galeev R.G., Manusov V.Z., Larkin E.N.
    - Размещение распределительного пункта на генплане сборного пункта с учетом всего жизненного цикла газового месторождения Батурин Н.С., Богачков И.М., Хамитов Р.Н.
  - Исследование каталитических свойств порошков системы «молибден-бор», синтезированных безвакуумным дуговым методом Васильева Ю.З., Некля Ю.А.
    - Процессы развития технологии нефтегазовой отрасли с использованием искусственного интеллекта Карсаков А.В., Зятиков П.Н., Шарф И.В.
  - «Микрофокус» первая станция в России для сочетания рентгеновских когерентных и некогерентных методов в геологии и геохимии Ракшун Я.В., Хомяков Ю.В., Глушков Е.И., Гоголев А.С., Горбачев М.В., Дарьин А.В., Дарьин Ф.А., Долбня И.П., Ращенко С.В., Чернов В.А., Чхало Н.И., Шарафутдинов М.Р.

- 174 Development of a technique for balancing a rocking machine with rotary counterweights and determination of its operability during a field experiment Solodky E.M., Petrochenkov A.B., Krivoshchekov S.N., Salnikov S.V., Vishnyakov D.D., Yudin R.Yu.
- 183 Преимущества использования трансформаторов с высокотемпературными сверхпроводящими обмотками на повышенной частоте в мобильных и автономных системах электроснабжения Галеев Р.Г., Манусов В.З., Ларкин Е.Н.
- **195** Distribution point placement on the general plan of the assembly point, taking into account the entire life cycle of a gas field Baturin N.S., Bogachkov I.M., Khamitov R.N.
- 207 Catalytic properties of molybdenum-boron system powders synthesized by vacuum-free arc method Vassilyeva Yu.Z., Neklya Yu.A.
- 216 Development of oil and gas industry technologies using artificial intelligence Karsakov A.V., Zyatikov P.N., Sharf I.V.
- 229 "Microfocus" is the first Russian beamline for combining X-ray coherent and incoherent methods for application in geology and geochemistry Rakshun Ya.V., Khomyakov Yu.V., Glushkov E.I., Gogolev A.S., Gorbachev M.V., Darin A.V., Darin F.A., Dolbnya I.P., Rashchenko S.V., Chernov V.A., Chkhalo N.I., Sharafutdinov M.R.

УДК 622.245.422+621.45.038.72 DOI: 10.18799/24131830/2025/5/4892 Шифр специальности ВАК: 2.6.9 Научная статья

# Изучение влияния наружных покрытий обсадных труб на качество сцепления цементного камня с обсадной колонной

### Ю.В. Прыкина<sup>1</sup>, М.М. Мельников<sup>1</sup>, Ю.Ж. Вагапова<sup>1⊠</sup>, И.С. Предеин<sup>2</sup>, В.Б. Губжоков<sup>3</sup>, А.В. Закалашный<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ООО «Исследовательский центр ТМК», Россия, г. Москва <sup>2</sup> АО «ТМК НГС-Нижневартовск», Россия, Ханты-Мансийский автономный округ – Югра <sup>3</sup> ООО «Нефтесервис», Россия, г. Тюмень

<sup>⊠</sup>yu.vagapova@tmk-group.com

Аннотация. Актуальность. Одной из важнейших задач при строительстве нефтяных и газовых скважин является обеспечение герметичности контактных зон «обсадная колонна – формируемый цементный камень – порода», которая определяет качество разобщения разбуриваемых коллекторов. Качественную изоляцию продуктивных горизонтов часто связывают со сцеплением твердеющего тампонажного раствора с наружной поверхностью стальных обсадных труб. На сегодняшний день предложено большое количество способов, направленных на повышение герметичности затрубного пространства обсадных колонн, один из относительно новых способов – применение защитных лакокрасочных покрытий со специальными свойствами. Имеется мнение, что данные наружные покрытия обсадных труб могут влиять на результаты геофизических работ при оценке качества цементирования и дальнейший мониторинг состояния скважины. Следовательно, появление нового граничного слоя - наружного лакокрасочного покрытия, будет влиять на точность результатов геофизических операций. Цель. Исследование взаимодействия обсадной трубы с наружным лакокрасочным покрытием и цементного камня в контактной зоне «обсадная колонна – цементный камень», оценка влияния граничного лакокрасочного слоя на результаты скважинных геофизических операций. Методы. Определение адгезионного взаимодействия (сцепления) цементного камня с наружной поверхностью обсадных труб методом сдвига и акустического импеданса методом ультразвуковой цементометрии. Результаты и выводы. Показано, что опробованная процедура оценки сцепления цементного камня с наружной поверхностью обсадной трубы методом сдвига является эффективной при определении адгезионного взаимодействия, что позволяет ранжировать данную величину для разных видов поверхностей. «Выявлено, что величина адгезионного взаимодействия цементного камня зависит не только от рельефа поверхности трубы, но и от природы лакокрасочного покрытия, а более высокие значения адгезии для образцов с рельефными покрытиями обусловлены большей удельной площадью поверхности при контакте с тампонажным составом. Установлено, что защитные лакокрасочные покрытия наружной поверхности обсадных труб не влияют на результаты и не затрудняют проведение скважинных геофизических операций при мониторинге состояния скважины и пластов, при этом обеспечивают защиту труб от коррозии.

**Ключевые слова:** защитные покрытия, обсадные трубы, цементный камень, адгезионное взаимодействие, акустический импеданс

Для цитирования: Изучение влияния наружных покрытий обсадных труб на качество сцепления цементного камня с обсадной колонной / Ю.В. Прыкина, М.М. Мельников, Ю.Ж. Вагапова, И.С. Предеин, В.Б. Губжоков, А.В. Закалашный // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 5. – С. 7–16. DOI: 10.18799/24131830/2025/5/4892

UDC 622.245.422+621.45.038.72 DOI: 10.18799/24131830/2025/5/4892 Scientific paper

## Impact of external coatings of casing pipes on adhesion quality of «set cement – casing string» system

# Yu.V. Prykina<sup>1</sup>, M.M. Melnikov<sup>1</sup>, Yu.Zh. Vagapova<sup>1⊠</sup>, I.S. Predein<sup>2</sup>, V.B. Gubzhokov<sup>3</sup>, A.V. Zakalashny<sup>1</sup>

<sup>1</sup> LLC «TMK Research», Moscow, Russian Federation <sup>2</sup> TMK NGS-Nizhnevartovsk, Khanty-Mansiysk Autonomous Okrug – Yugra, Russian Federation <sup>2</sup> LLC «Nefteservice», Tyumen, Russian Federation

<sup>™</sup>yu.vagapova@tmk-group.com

Abstract. Relevance. One of the most important tasks in oil and gas well site construction is to ensure the integrity of contact zones «casing string - formed set cement - rock», which determines the isolation quality of drilled out reservoirs. Highquality isolation of production intervals is often associated with the adhesion of hardening cement slurry to external surface of steel casing pipes. Currently, a large number of methods have been proposed to increase the integrity of casing-formation annulus; one of the respectively new methods is using of protective paint coatings with special properties. It is believed that these external coatings of casing pipes can affect the geophysical work results during diagnostic of cementation quality and further monitoring the well condition. Thus, appearance of new boundary layer - external paint coating - can affect the accuracy of geophysical operations results. Aim. To study the interaction of casing pipes with external paint coatings and set cement in contact zone «casing string – set cement», to assess boundary paint layer impact on geophysical operations quality. Methods. Determination of adhesive interaction (adhesion) of set cement with casing pipes external surface by shear method and acoustic impedance by ultrasonic cementometry. Results and conclusions. It was shown that the given procedure for assessing the adhesion of set cement to casing pipes external surface by shear method is effective in determining the adhesive interaction, which makes possible to grade this value for different types of surfaces. It was revealed that the adhesive interaction value depends not only on pipe surface relief, but also on coatings characteristics. It was found that higher adhesion values for samples with relief coatings are explained by a larger specific surface area of their contact with cement slurry. It was established that protective paint coatings on casing pipes external surface do not affect the results and do not complicate geophysical operations for monitoring the well condition and provide protection of pipes from corrosion.

Keywords: protective coatings, casing pipes, set cement, adhesive interaction, acoustic impedance

**For citation**: Prykina Yu.V., Melnikov M.M., Vagapova Yu.Zh., Predein I.S., Gubzhokov V.B., Zakalashny A.V. Impact of external coatings of casing pipes on adhesion quality of «set cement – casing string» system. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 5, pp. 7–16. DOI: 10.18799/24131830/2025/5/4892

#### Введение

Успешность строительства нефтяных и газовых скважин базируется на множестве технологических факторов. К их числу относят обеспечение герметичного контакта на границе «обсадная колонна – цементный камень – порода» в разобщенных бурением породах-коллекторах. Данный параметр напрямую влияет на надлежащее функционирование скважины в течение всего ее жизненного цикла. Герметичность контакта зависит от условий формирования цементного камня, в ходе которого происходит набор его прочностных свойств, что обеспечивает стойкость обсадной колонны к различным агрессивным средам [1, 2].

Качественную изоляцию продуктивных горизонтов и крепление стенок скважины связывают с отсутствием заколонных перетоков и проседанием обсадной колонны, достигаемых за счет сцепления твердеющего тампонажного раствора с наружной поверхностью трубы и массивом породы. Формирование цементного камня зависит от состава тампонажного раствора и режимов его твердения, а также от [3–5]:

- диаметра скважины;
- наличия фильтрационной корки бурового раствора;
- рельефа наружной поверхности труб.

На сегодняшний день предложено большое количество способов, направленных на повышение герметичности затрубного пространства обсадных колонн. Условно их можно разделить на следующие основные группы:

 усовершенствование рецептур технологических жидкостей (буровых, буферных и тампонажных растворов) и контроль их совместимости;

- применение разных способов вскрытия пластов и приемов при освоении скважин (искусственное создание репрессии на пласт и различные способы центрирования колонн);
- создание дополнительной рельефности на наружной поверхности обсадных труб [6, 7].

К последним относят приемы придания шероховатости по меньшей мере одному участку наружной поверхности обсадной колонны, расположенному в зоне контакта с агрессивными средами.

Относительно новым способом является применение защитных покрытий со специальными свойствами, позволяющими улучшить качество сцепления цементного камня с наружной поверхностью обсадной колонны. Ранее были предложены стеклоэмалевые и смолопесчаные покрытия обсадных труб как с различными наполнителями [8, 9], так и с дополнительной обработкой поверхности покрытия [10]. Данные виды покрытий не нашли применение на практике по причине их высокой хрупкости и стоимости [11].

На сегодняшний день для строительства скважин поставляют обсадные трубы с наружным консервационным покрытием или без покрытия. Стальные трубы без покрытия подвержены атмосферной коррозии в период их транспортирования и хранения. Консервационные покрытия предназначены для защиты труб от атмосферной коррозии на период не более одного года, как правило, от трех до шести месяцев [12-14]. Наружная поверхность обсадных труб с консервационным покрытием является гладкой, что способствует отсутствию или частичному сцеплению на границе «обсадная колонна – цементный камень». Кроме того, при хранении стальных труб более полугода на открытых площадках, особенно в условиях морского климата, неизбежно разрушение или отслоение консервационного покрытия и появление продуктов коррозии.

На практике известны текстурированные защитные лакокрасочные покрытия на основе эпоксидных смол, обладающие дополнительной рельефностью. Как известно, эпоксидные лакокрасочные покрытия обладают высокими антикоррозионными свойствами [15, 16]. Таким образом, указанные материалы могут быть использованы для усиления сцепления цементного камня с обсадной колонной.

Целью данной работы является исследование взаимодействия обсадных труб с наружным лакокрасочным покрытием и цементного камня в контактной зоне «обсадная колонна – цементный камень». Полученные данные позволят осуществить ранжирование защитных лакокрасочных покрытий труб по эксплуатационным свойствам и адгезионному взаимодействию с цементным камнем. Ввиду того, что в системе «труба – цементный камень – порода» появится новый граничный лакокрасочный поверхностный слой, целесообразно будет оценить его влияние при проведении скважинных геофизических операций.

#### Объекты и методика исследования Материалы исследования

Для исследований были изготовлены образцы в виде трубных сегментов круглой формы Ø 49 мм, толщиной стенки 4 мм и патрубков Ø 89 мм с разными типами поверхности:

- без защитных покрытий с наличием окалины;
- с защитным лакокрасочным покрытием с рельефной поверхностью;
- с защитным лакокрасочным покрытием с глад-кой поверхностью;
- с консервационным покрытием с гладкой поверхностью.

Ниже приведены характеристики объектов исследования и видов лакокрасочных покрытий:

1) Образцы с рельефной поверхностью:

- с гладкой рельефной поверхностью (эффект «муар») – однослойное покрытие на основе эпоксидной порошковой краски № 1 (ЭП-1-1);
- с матовой поверхностью со слабо выраженным рельефом – двухслойное покрытие на основе эпоксидной порошковой краски № 1 (ЭП-2-1);
- с гладкой рельефной поверхностью (эффект «муар») – двухслойное покрытие на основе эпоксидной порошковой краски № 2 (ЭП-2-2);
- с гладкой поверхностью со слабо выраженным рельефом – однослойное покрытие из гидроизоляционного материала на каучуково-смоляной основе (ГМ-1).

2) Образцы с гладкой, ровной поверхностью:

- однослойное покрытие на основе эпоксидной порошковой краски № 2 (ЭП-1-2);
- консервационное покрытие на основе УФотверждаемого лака (УФ-1);
- консервационное покрытие на основе воднодисперсионного лака (ВД-1).

3) Образец без покрытия (с окалиной на поверхности).

## Определение эксплуатационных свойств покрытий

Исследования проводили с целью оценки физико-механических показателей покрытий в исходном состоянии и после воздействия различных сред. Выдержку в средах проводили с целью ранжирования покрытий по эксплуатационным свойствам: защита от коррозии на период транспортирования и хранения, а также в процессе эксплуатации.

Испытательные среды, методы и условия испытаний:

I. Климатические испытания:

- Стойкость лакокрасочных покрытий к переменной температуре, повышенной влажности и солнечному излучению (условия умереннохолодного климата – УХЛ 1) продолжительность 9 циклов по ГОСТ 9.401, метод 3.
- Стойкость лакокрасочных покрытий к воздушной среде с переменными температурами от минус (60 ±3) до (60 ±3) °С, продолжительность 15 циклов по ГОСТ 27037.

II. Испытания на стойкость к модельным средам:

- 1. Стойкость лакокрасочных покрытий к воздействию дистиллированной воды при температуре (80 ±3) °С в течение 240 часов по ГОСТ 9.403, метод А.
- Стойкость лакокрасочных покрытий к термобарическим воздействиям в 5%-м растворе NaCl, насыщенном 1,0 МПа CO<sub>2</sub>, в течение 240 ч по ГОСТ Р 58346, приложение Д.

#### Определение адгезионного взаимодействия в системе «труба – цементный камень»

Испытание по определению адгезионного взаимодействия наружных покрытий с цементным камнем заключалось в определении усилия сдвига, необходимого для нарушения взаимодействия между цементным камнем и наружным покрытием трубы.

Основные этапы испытания для определения адгезионного взаимодействия наружных покрытий с цементным камнем:

- подготовка испытательных ячеек, заливка тампонажного раствора;
- формирование цементного камня;
- определение усилия сдвига.

Последовательность проведения испытания по оценке качества контакта цементного камня с обсадной колонной представлена на рис. 1. Для цементного раствора использовали портландцемент марки «М-500 ЦЕМ I 42,5Б» с водоцементным соотношением (В/Ц) – 0,67. Твердение цементного раствора осуществляли в термостате при температуре (75±3) °С и относительной влажности  $\geq$ 97 % в течение 24 ч.

В течение двух часов после окончания твердения цементного раствора провели выдавливание образца из формы для заливки под действием непрерывно возрастающего усилия со скоростью (10±1) мм/мин и зафиксировали усилие сдвига, необходимое для отрыва цементного камня от поверхности образца.

#### Оценка влияния наружных покрытий как нового граничного слоя на результаты скважинных геофизических операций в системе «труба – цементный камень – порода

Авторами отмечено [17, 18], что наружные покрытия стальных труб могут влиять на результаты геофизических работ (ГИС) при оценке качества цементирования и мониторинга состояния скважины в целом. Связываемые затруднения основаны на том, что регистрируемые волновые характеристики, создаваемые в колонне разными частотами источника излучения, приобретают индивидуальные значения для каждого граничащего слоя - обсадной колонны, цементного камня и породы. Было предположено, что появление нового граничного слоя наружного лакокрасочного покрытия – будет заведомо снижать или завышать регистрируемые параметры для основных фаз и искажать результаты ГИС. Для оценки влияния наружного покрытия обсадных труб на достоверность проведения геофизических исследований были определены значения акустического импеданса (MRayl) на образцах без покрытия и на образцах с различными типами покрытий методом ультразвуковой цементометрии.





**Рис. 1.** Последовательность проведения лабораторных испытаний по оценке качества контакта цементного камня с обсадной колонной: а) заливка тампонажного раствора и формирование цементного камня; б) схема определения усилия сдвига, необходимого для отрыва цементного камня от поверхности образца

*Fig. 1.* Order of laboratory tests for assessing the contact quality between set cement and casing string: a) sealing of cement slurry and set cement forming; b) principle of determining shear force required to set cement detachment from sample surface

Эксперименты проводили на ультразвуковом анализаторе прочности цементного камня UCA model 304 путем соотнесения получаемых сигналов (импеданса) на образцах с покрытием и без покрытия. Опытные образцы помещали примерно посередине камеры установки. Для этого подготовленный тампонажный раствор с В/Ц=0,67 заливали в камеру прибора примерно до середины ее высоты, размещали в ней опытный образец, затем добавляли остаток раствора. Испытания проводили в процессе твердения тампонажного раствора в течение 24 часов при температуре 75 °C и давлении в ячейке 20 МПа. Схема расположения опытного образца в камере установки UCA model 304 приведена на рис. 2.



**Рис. 2.** Схема расположения опытного образца в камере установки UCA model 304

Fig. 2. Layout of test sample in UCA model 304 chamber

С целью дополнительной оценки качества сцепления наружного покрытия обсадной трубы с цементным камнем использовали разработанную авторами методику расчета индекса цементирования [19, 20] по коэффициенту качества сцепления (CQI). Его определяют по соотношению значений теоретического идеального акустического импеданса для конкретного тампонажного раствора к его фактической величине, полученной в реальной скважине. За теоретический импеданс цемента (I<sub>т</sub>) было принято значение импеданса цементного камня (I<sub>п</sub>), сформированного из тампонажного раствора нормальной плотности на основе портландцемента марки ПЦТ I G CC 1, а за расчетный или фактический импеданс цемента (I<sub>p</sub>) – импеданс, полученный для систем: «цементный камень стальной образец без покрытия»; «цементный камень - стальной образец с рельефным/гладким покрытием» (І<sub>п</sub>).

#### CQI=I<sub>17</sub>/I<sub>11</sub>.

За референсные значения CQI были приняты данные нефтяных компаний по месторождениям, приведенные авторами методики [21], согласно которой CQI≥0,8 отн. ед. характеризует сплошной контакт, а 0,8>CQI>0,25 – частичное сцепление.

#### Результаты исследования и их обсуждение Определение эксплуатационных свойств материалов

В табл. 1 приведены исходные физикомеханические показатели исследуемых покрытий.

Таблица 1.	Исходные физико-механические показатели покрытий
Table 1.	Initial physical and mechanical properties of coatings

	Результаты испытаний Test results						
Показатель/Criteria	Рельефная поверхность Relief surface				Гладкая поверхность Smooth surface		
	ЭП-1-1 EP-1-1	ЭП-2-1 EP-2-1	ЭП-2-2 EP-2-2	ГМ-1 GM-1	ЭП-1-2 EP-1-2	УФ-1 UV-1	ВД-1 VD-1
Толщина покрытия, мкм Coating thickness, mkm	293	559	369	471	350	76	75
Адгезия покрытия к стали методом X-образного надреза (исходная) Adhesion of coating to steel using X-cut test method (initial)	0	0	0	0	0	0	0
Адгезия покрытия к стали методом нормального отрыва, МПа (исходная) Adhesion of coating to steel using Pull-off test method, MPa (initial)	10,3	10,2	11,3	2,0	9,8	-	-
Шероховатость Rz, мкм/Roughness Rz, mkm	120	26	98	20	3	0,68	2,8
Прогнозируемый срок службы покрытия в условиях умеренно-холодного климата Predicted lifetime of coating in boreal climate conditions	Не менее 1 года/At least 1 year						

\* «-» – испытание не проводили, так как данный метод рекомендован для покрытий толщиной более 250 мкм/test was not carried out, because this method is recommended for coatings with a thickness more than 250 microns.

По результатам климатических и коррозионных испытаний было установлено:

- Все исследуемые покрытия обеспечивают защиту стальных труб от атмосферной коррозии сроком не менее одного года на период их транспортирования и хранения в условиях переменных температур, повышенной влажности и солнечного излучения умеренно-холодного климата (УХЛ1).
- 2. Воздействие модельных эксплуатационных сред привело к потере защитных свойств покрытий или значительному снижению физико-механических показателей. В частности, на образцах УФ-1 и ВД-1 после воздействия модельных сред наблюдали растрескивание и отслаивание консервационных покрытий. Данное разрушение вызвано высокой проницаемостью данных покрытий. На образцах ЭП-1-1, ГМ-1, ЭП-1-2 было зафиксировано снижение адгезии однослойного защитного покрытия более чем на 50 % после воздействия модельной среды под давлением при повышенной температуре.

Полученные результаты показали, что наилучшими эксплуатационными характеристиками на всех этапах жизненного цикла трубной продукции обладают двухслойные покрытия на основе эпоксидных смол ЭП-2-1 и ЭП-2-2.

#### Определение адгезионного взаимодействия в системе «обсадная труба – цементный камень»

На рис. 3 представлены результаты определения адгезионного взаимодействия (сцепления) цементного камня с наружной поверхностью опытных образцов, полученные методом сдвига. Исследования проводили как на исходных образцах, так и на образцах после ускоренных климатических испытаний в умеренно-холодном климате.



- **Рис. 3.** Результаты испытаний по определению адгезионного взаимодействия в системе «обсадная труба цементный камень»
- Fig. 3. Tests results of determining the adhesion interaction in the «casing string set cement» system

Результаты исследований показали:

- Значение адгезионного взаимодействия зависит не только от рельефа поверхности, но и от природы лакокрасочного покрытия. Так, к примеру, покрытие ГМ-1 на каучуково-смоляной основе показало высокие значения рассматриваемого параметра, несмотря на поверхность со слабо выраженным рельефом. При этом оно не является стойким в модельной эксплуатационной среде.
- Наибольшую величину адгезионного взаимодействия (сцепления) с цементным камнем показали образцы с рельефным покрытием на основе эпоксидных смол ЭП-1-1 и ЭП-2-2, R<sub>z</sub>=120 и R<sub>z</sub>=98 мкм соответственно, наименьшую – образцы с гладкой поверхностью ЭП-1-2 и УФ-1, R<sub>z</sub>=3 и R<sub>z</sub>=0,68 мкм.

Очевидно, что более высокие значения адгезии для образцов с рельефными покрытиями обусловлены большей удельной площадью поверхности при контакте с тампонажным раствором.

 Для всех исследованных покрытий не зафиксировано снижение значений сцепления с цементным камнем после воздействия климатических факторов, моделирующих условия хранения и транспортирования труб.

Полученные результаты свидетельствуют о возможном применении наружных защитных покрытий обсадных труб как для защиты от атмосферной коррозии, так и для улучшения адгезионного взаимодействия с цементным камнем на границе «обсадная труба – цементный камень».

#### Оценка влияния наружных покрытий обсадных труб на качество геофизических исследований с использованием акустического импеданса

Для исследований были выбраны образцы с двумя видами покрытий, показавших наибольшее и наименьшее адгезионное взаимодействие с цементным камнем – ЭП-2-2 и УФ-1. Результаты параметров, регистрируемых при проведении акустической цементометрии на ультразвуковом анализаторе, приведены в табл. 2.

Дополнительно было определено качество контакта цементного камня (CQI) с различными видами наружных поверхностей труб – на образце без покрытия и образцах с покрытиями ЭП-2-2 и УФ-1. Результаты приведены на рис. 4, красной линией отмечено достижение CQI значений ≥0,8 отн. ед.

Результаты измерений показали одинаковые значения акустического импеданса для всех видов образцов, а значения прочности сформированного цементного камня – достоверность проведенного эксперимента. По параметру CQI установлено, что для всех образцов достигнут сплошной контакт с цементным камнем.

Вид образца Sample type	Время прохождения сигнала, µs Signal transit time, µs	Акустический импеданс, MRayl (106*кг/м²*с) Acoustic impedance, MRayl (106*kg/m²*s)	Прочность камня, psi Set strength, psi
Цементный камень Set cement	17,2	6,4	4720
Цементный камень – образец без покрытия Set cement – uncoated sample	17,5	6,2	4452
Цементный камень – образец с покрытием ЭП-2-2 Set cement – sample with EP-2-2 coating	17,6	6,2	4350
Цементный камень – образец с покрытием УФ-1 Set cement – sample with UV-1 coating	17,7	6,2	4270

Таблица 2.Результаты акустической цементометрии на ультразвуковом анализатореTable 2.Results of acoustic cementometry determined by ultrasonic analyzer



На основании полученных результатов можно сделать вывод, что защитные лакокрасочные покрытия наружной поверхности обсадных труб не влияют на результаты и не затрудняют проведение различных скважинных геофизических операций при мониторинге состояния скважины и пластов, при этом обеспечивают защиту труб от коррозии.

#### Заключение

 Опробованная процедура оценки сцепления цементного камня с наружной поверхностью обсадных труб методом сдвига показала эффективность при определении адгезионного взаимодействия, что позволяет ранжировать данную величину для разных видов поверхностей.



- Рис. 4. Коэффициент качества сцепления на границах контакта: а) «цементный камень – образец без покрытия»; б) «цементный камень – образец с покрытием ЭП-2-2»; в) «цементный камень – образец с покрытием УФ-1»
- Fig. 4. Coefficient of cementation quality at contact boundaries: a) «set cement – uncoated sample»; b) «set stone – sample with EP-2-2 coating»; c) «set stone – sample with UV-1 coating»
  - Значение адгезионного взаимодействия зависит не только от рельефа поверхности, но и от природы лакокрасочного покрытия.
  - Более высокие значения адгезии для образцов с рельефными покрытиями обусловлены большей удельной площадью поверхности при контакте с тампонажным составом.
  - 4. Защитные лакокрасочные покрытия наружной поверхности обсадных труб не влияют на результаты и не затрудняют проведение скважинных геофизических операций при мониторинге состояния скважины и пластов, при этом обеспечивают защиту труб от коррозии.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Щербаков Д.В. Существующие проблемы при цементировании скважин // Нефть. Газ. Новации. 2013. № 3 (170). С. 41–45.
- 2. Интегрированное решение по повышению качества крепления скважин в интервалах терригенных отложений / А.Ф. Галиев, И.Р. Рафиков, А.В. Самсыкин, Т.Р. Мардаганиев, Ф.А. Агзамов // Нефтяное хозяйство. 2019. № 9. С. 29–33. DOI: 10.24887/0028-2448-2019-9-29-33.
- 3. Мелехин А.А., Крысин И.Н., Третьяков Е.О. Анализ факторов, влияющих на долговечность цементного камня за обсадной колонной // Нефтепромысловое дело. 2013. № 9. С. 77–82.
- 4. Николаев Н.И., Хаоя Л. Результаты исследования зоны контакта «цементный камень-горная порода» // Записки Горного института. 2017. Т. 226. С. 428–434. DOI: 10.25515/PMI.2017.4.428.
- Дерендяев В.В., Черепанов П.В. Оценка влияния различных составов и комплексов буферных жидкостей на плотность контакта тампонажного камня с сопредельными средами в межколонном пространстве // Проблемы разработки месторождений углеводородных и рудных полезных ископаемых. – 2020. – Т. 2. – С. 108–115.
- 6. Живаева В.В. Методика определения факторов, влияющих на прочность адгезионной связи цементного камня с обсадной колонной // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. 2010. № 5. С. 36–38.
- Батыров М.И., Шиян С.И. Поинтервальная оценка качества цементирования обсадных колонн в скважинах и боковых стволах скважин в пределах Каменной площади Красноленинского нефтяного месторождения // Булатовские чтения. – 2020. – Т. 1. – С. 60–72.
- 8. Способ формирования шероховатого полимерного защитного покрытия на обсадной трубе: пат. № 2633206, Российская Федерация, С1; заявл. 15.12.2015; опубл. 11.10.2017, Бюл. № 17. – 8 с.
- 9. Петров Н.А. Новое покрытие с полифункциональными свойствами для обсадных колонн // Электронный научный журнал Нефтегазовое дело. 2010. № 2. URL: https://ogbus.ru/files/ogbus/authors/PetrovNA/PetrovNA\_18.pdf (дата обращения: 07.10.2024).
- 10. Способ формирования шероховатого стеклоэмалевого покрытия: пат. № 2123541, Российская Федерация, С1; заявл. 17.06.1997; опубл. 20.12.1998. 6 с.
- 11. Suleimanov B.A., Abbasov H.F., Ismailov Sh.Z. A comprehensive review on sand control in oil and gas wells Part 1. Mechanical techniques // SOCAR Proceedings. 2024. № 3. P. 9–23. DOI: 10.5510/OGP20240300988.
- 12. Farh H.M.H, Seghier M.E.A.B., Zayed T. A comprehensive review of corrosion protection and control techniques for metallic pipelines // Engineering Failure Analysis. 2023. Vol. 143. P. A. P. 106885. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2022.106885.
- Critical review of the time-dependent performance of polymeric pipeline coatings: focus on hydration of epoxy-based coatings / H. Zargarnezhad, E. Asselin, D. Wong, C.N.C. Lam // Polymers. – 2021. – Vol. 13. – P. 1517. DOI: 10.3390/polym13091517.
- Al-Borno A., VanDerVeen A. Field and laboratory studies on the effect of UV degradation and UV protector paints on stockpiles of FBE coated pipeline // AMPP Annual Conference + Expo. – 2022. – AMPP-2022-17853.
- 15. The effect of laser surface textures on the adhesion strength and corrosion protection of organic coatings Experimental assessment using the pull-off test and the shaft load blister test / S.J. Caraguay, T.S. Pereira, A. Cunha, M. Pereira, F.A. Xavier // Progress in Organic Coatings. 2023. Vol. 180. P. 107558. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2023.107558.
- Li C., Wang P., Zhang D. A robust and anti-UV layered textured superhydrophobic surface based on water-glass interface enhancement // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. – 2021. – Vol. 624. – P. 126835. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2021.126835.
- 17. Winn R.H., Anderson T.O., Carter L.G. A preliminary study of factors influencing cement bond logs // Journal of Petroleum Technology. 1962. Vol. 14 (4). P. 369–372. DOI: 10.2118/132-PA.
- 18. Foianini I., Frisch G., Jones P. Successful identification and bond assessment of epoxy-based resin cement behind production casing: integrating cementing technology with new log interpretation methodology to provide an innovative well integrity solution // SPWLA 55th Annual Logging Symposium. 2014. SPWLA-2014-HHH.
- 19. Шумилов А.В. Методика контроля качества цементирования по акустическому импедансу // Геофизика. 2019. № 3. С. 60–65.
- 20. Rutledge J.M. Method for cement evaluation using acoustical logs. U.S. Patent 5036496.
- 21. Шумилов А.В. Создание модульной системы обработки информации и специальных технологических решений для повышения эффективности геофизических исследований наклонно-направленных скважин: дис. ... д-ра техн. наук. Пермь, 2021. 288 с.

#### Информация об авторах

Юлия Вячеславовна Прыкина, заведующий лабораторией защитных покрытий и полимерных функциональных материалов ООО «Исследовательский центр ТМК», Россия, 121205, г. Москва, ул. Большой бульвар, 5. yuliya.prykina@tmk-group.com

**Максим Михайлович Мельников**, заведующий лабораторией антикоррозионных и консервационных покрытий ООО «Исследовательский центр ТМК», Россия, 121205, г. Москва, ул. Большой бульвар, 5. MelnikovMM@tmk-group.com; https://orcid.org/0009-0000-4543-0803

Юлия Жановна Вагапова, младший научный сотрудник лаборатории защитных покрытий и полимерных функциональных материалов ООО «Исследовательский центр ТМК», Россия, 121205, г. Москва, ул. Большой бульвар, 5. yu.vagapova@tmk-group.com, https://orcid.org/0000-0001-6958-2334

**Игорь Сергеевич Предеин**, технический директор АО «ТМК НГС-Нижневартовск», Россия, 628637, Ханты-Мансийский автономный округ – Югра, Нижневартовский район, Самотлорское месторождение нефти, Нижневартовская база по ремонту труб, строение 1. igor.predein@tmk-group.com **Виталий Борисович Губжоков**, заведующий производственно-испытательной лабораторией 000 «Нефтесервис», Россия, 625512, г. Тюмень, 23-й км Федеральной автодороги Тюмень–Тобольск–Ханты-Мансийск, стр. 1, зд. 4. gubzhokov.vb@nefteserv.ru

**Александр Вадимович Закалашный**, инженер-исследователь лаборатории защитных покрытий и полимерных функциональных материалов ООО «Исследовательский центр ТМК», Россия, 121205, г. Москва, ул. Большой бульвар, 5. a.zakalashnyy@tmk-group.com, https://orcid.org/0009-0007-2006-6938

Поступила в редакцию: 06.11.2024 Поступила после рецензирования: 18.11.2024 Принята к публикации: 24.12.2024

#### REFERENCES

- 1. Scherbakov D.V. Existing challenges in well cementing. Neft. Gas. Novatsii, 2013, no. 3 (170), pp. 41-45. (In Russ.)
- Galiev A.F., Rafikov I.R., Samsykin A.V., Mardaganiev T.R., Agzamov F.A. Integrated solution to the issue of improving the quality of well casing in terrigenous sediments. *Oil Industry*, 2019, no. 9, pp. 29–33. (In Russ.) DOI: 10.24887/0028-2448-2019-9-29-33.
- 3. Melekhin A.A., Krysin N.I., Tretyakov E.O. Analysis of factors affecting the life time period of cement stone behind a casing string. *Oilfield Engineering*, 2013, no. 9, pp. 77–82. (In Russ.)
- 4. Nikolaev N.I., Haoya L. Results of the study of the «cement stone-rock» contact zone. *Journal of Mining Institute*, 2017, vol. 226, pp. 428–434. (In Russ.) DOI: 10.25515/PMI.2017.4.428.
- 5. Derendyaev V.V., Cherepanov P.V. Impact assessment of various compositions and complexes of spacer fluids on the density of contact of the grouting stone with contiguous media in the inter-column space. *Problems of developing hydrocarbon and ore mineral deposits*, 2020, vol. 2, pp. 108–115. (In Russ.)
- 6. Zhivaeva V.V. The method to define factors affecting adhesive bond strength of plugging material with casing string. *Onshore and offshore oil and gas well construction*, 2010, no. 5, pp. 36–38. (In Russ.)
- 7. Batyrov M.I., Shiyan S.I. Internal assessment of the quality of cementation of casing strings in wells and lateral wells within the Kamennaya square of Krasnoleninskoe oil field. *Readings of A.I. Bulatov*, 2020, vol. 1, pp. 60–72. (In Russ.)
- 8. Kalachev M.V., Kalachev I.F., Kalachev V.I., Kalachev A.I., Savin I.A. *Method for forming roughe protective polymer coating on casing pipe*. Patent RF, no. 2633206, 2017. (In Russ.)
- 9. Petrov N.A. The new covering with multifunctional properties for field performance columns. *The network journal «Oil and Gas Business»*, 2010, no. 2. (In Russ.) Available at: https://ogbus.ru/files/ogbus/authors/PetrovNA/PetrovNA\_18.pdf (accessed 7 October 2024).
- 10. Budnikov V.F., Budnikov D.V., Shachin A.A. *Method of formation of rough glass-enamel coating*. Patent RF, no. 2123541, 1998. (In Russ.)
- 11. Suleimanov B.A., Abbasov H.F., Ismailov Sh.Z. A comprehensive review on sand control in oil and gas wells Part 1. Mechanical techniques. *SOCAR Proceedings*, 2024, no. 3, pp. 9–23. DOI: 10.5510/OGP20240300988.
- 12. Farh H.M.H, Seghier M.E.A.B, Zayed T. A comprehensive review of corrosion protection and control techniques for metallic pipelines. *Engineering Failure Analysis*, 2023, vol. 143, P. A, pp. 106885. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2022.106885.
- 13. Zargarnezhad H., Asselin E., Wong D., Lam C.N.C. Critical review of the time-dependent performance of polymeric pipeline coatings: focus on hydration of epoxy-based coatings. *Polymers*, 2021, vol. 13, pp. 1517. DOI: 10.3390/polym13091517.
- 14. Al-Borno A., VanDerVeen A. Field and laboratory studies on the effect of UV degradation and UV protector paints on stockpiles of FBE coated pipeline. *AMPP Annual Conference + Expo*. San Antonio, Texas, AMPP, 2022. AMPP-2022-17853.
- 15. Caraguay S.J., Pereira T.S., Cunha A., Pereira M., Xavier F.A. The effect of laser surface textures on the adhesion strength and corrosion protection of organic coatings Experimental assessment using the pull-off test and the shaft load blister test. *Progress in Organic Coatings*, 2023, vol. 180, pp. 107558. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2023.107558.
- 16. Li C., Wang P., Zhang D. A robust and anti-UV layered textured superhydrophobic surface based on water-glass interface enhancement. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2021, vol. 624, pp. 126835. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2021.126835.
- 17. Winn R.H., Anderson T.O., Carter L.G. A Preliminary Study of Factors Influencing Cement Bond Logs. *Journal of Petroleum Technology*, 1962, vol. 14 (4), pp. 369–372. DOI: 10.2118/132-PA.
- 18. Foianini I., Frisch G., Jones P. Successful identification and bond assessment of epoxy-based resin cement behind production casing: integrating cementing technology with new log interpretation methodology to provide an innovative well integrity solution. *SPWLA 55th Annual Logging Symposium*, Abu Dhabi, SPWLA, 2014. SPWLA-2014-HHH.
- 19. Shumilov A.V. Acoustic impedance cementing quality control method. Geophysics, 2019, no. 3, pp. 60-65. (In Russ.).
- 20. Rutledge J.M. Method for cement evaluation using acoustical logs. U.S. Patent 5036496.
- 21. Shumilov A.V. Development of a modular information processing system and special technological solutions to increase the efficiency of geophysical studies of directional wells. Dr. Diss. Perm, 2021. 288 p. (In Russ.).

#### Information about the authors

**Yuliya V. Prykina**, Head of Laboratory of Protective Coatings and Polymer Functional Materials LLC «TMK Research», 5, Bolshoy bulvar street, Moscow, 121205, Russian Federation. yuliya.prykina@tmk-group.com

**Maksim M. Melnikov**, Head of Laboratory of Anti-corrosion and Conservation Coatings LLC «TMK Research», 5, Bolshoy bulvar street, Moscow, 121205, Russian Federation. MelnikovMM@tmk-group.com; https://orcid.org/0009-0000-4543-0803

**Yuliya Zh. Vagapova**, Associate Scientist, LLC «TMK Research», 5, Bolshoy bulvar street, Moscow, 121205, Russian Federation. yu.vagapova@tmk-group.com; https://orcid.org/0000-0001-6958-2334

**Igor S. Predein**, Technical Director, TMK NGS-Nizhnevartovsk, Nizhnevartovsk pipe repair base, bld 1, Samotlor oilfield, Nizhnevartovsk region, Khanty-Mansiysk Autonomous Okrug – Yugra, 628637, Russian Federation. igor.predein@tmk-group.com

**Vitaliy B. Gubzhokov**, Head of Manufacturing and Testing Laboratory LLC «Nefteservice», bld 1, 4, 23<sup>rd</sup> km of Federal highway Tyumen–Tobolsk–Khanty-Mansiysk, Tyumen, 625512, Russian Federation. gubzho-kov.vb@nefteserv.ru

**Aleksandr V. Zakalashny**, Research Engineer, LLC «TMK Research», 5, Bolshoy bulvar street, Moscow, 121205, Russian Federation. a.zakalashnyy@tmk-group.com; https://orcid.org/0009-0007-2006-6938

Received: 06.11.2024 Revised: 18.11.2024 Accepted: 24.12.2024 УДК 532.546/553.984 DOI: 10.18799/24131830/2025/5/4732 Шифр специальности ВАК: 25.00.22 Обзорная статья

# Разработка коллекции микрофлюидных чипов для изучения многофазных потоков в задачах нефтегазовой индустрии

### А.С. Якимов, В.Д. Мешкова<sup>⊠</sup>, Д.В. Гузей, А.И. Пряжников, А.В. Минаков

Сибирский федеральный университет, Россия, г. Красноярск

<sup>™</sup>Redel-VD@yandex.ru

Аннотация. Актуальность. Микрофлюидные чипы, имитирующие структуру горной породы, являются одним из немногочисленных методов, позволяющих визуализировать микромасштабные гидродинамические процессы, протекающие в пористых средах. Целью данной работы является описание методики разработки микрофлюидных чипов-моделей горных пород с различной проницаемостью и характеристиками смачиваемости, на основе которой была разработана коллекция микрофлюидных чипов, которую рекомендовано использовать для решения задач в нефтегазовой индустрии. Методы. Для реализации поставленной цели применялись методы лабораторного и численного моделирования. Предложены и апробированы на практике новые алгоритмы построения искусственных топологий пористых тел с изотропными и анизотропными характеристиками проницаемости, а также адаптирована методика оцифровки натуральных изображений для получения на их основе топологий чипов. Результаты и выводы. Полученные результаты демонстрируют успешную реализацию рассматриваемой методики. С ее помощью были разработаны различные топологии чипов-моделей, имитирующих горную породу, которые и легли в основу разработки коллекции. Особое внимание было уделено созданию топологий, направленных на изучение течения жидкости в зоне трещины гидроразрыва пласта и буровых растворов, а также для моделирования течений на масштабе отдельных пор в районах трещин и стыков пород с разными фильтрационно-емкостными характеристиками. Основным выводом исследования является то, что созданную коллекцию микрофлюидных чипов рекомендовано использовать для лабораторного моделирования физико-химических процессов в прискважинной зоне, а также для тестирования разрабатываемых математических моделей и верификации численных алгоритмов.

Ключевые слова: микрофлюидика, пористая среда, керн, моделирование в масштабе пор, методика, алгоритмы

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-79-30022, https://rscf.ru/project/23-79-30022/

**Для цитирования:** Разработка коллекции микрофлюидных чипов для изучения многофазных потоков в задачах нефтегазовой индустрии / А.С. Якимов, В.Д. Мешкова, Д.В. Гузей, А.И. Пряжников, А.В. Минаков // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 5. – С. 17–28. DOI: 10.18799/24131830/2025/5/4732

UDC 532.546/553.984 DOI: 10.18799/24131830/2025/5/4732 Review article

## Development of a collection of microfluidic chips for studying multiphase flows in the oil and gas industry

A.S. Yakimov, V.D. Meshkova<sup>⊠</sup>, D.V. Guzey, A.I. Pryazhnikov, A.V. Minakov

Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russian Federation

<sup>™</sup>Redel-VD@yandex.ru

**Abstract.** *Relevance.* Microfluidic chips simulating the structure of rocks are one of the few methods that allow visualizing microscale hydrodynamic processes occurring in porous media. *Aim.* To describe the methodology for developing microfluid-ic chip models of rocks with different permeability and wettability characteristics, on the basis of which a collection of microfluidic chips was developed. The latter is recommended for use in solving problems in the oil and gas industry. *Methods.* To

achieve this goal, laboratory and numerical modeling methods were used. New algorithms for constructing artificial topologies of porous bodies with isotropic and anisotropic permeability characteristics were proposed and tested in practice, and a technique for digitizing natural images was adapted to obtain chip topologies on their basis. **Results and conclusions.** The obtained results demonstrate the successful implementation of the considered method. With its help the authors developed various topologies of the chip models simulating rock, which easily formed the basis for the development of the collection.Particular attention was paid to the creation of topologies aimed at studying the flow of liquid in the zone of a hydraulic fracturing crack and drilling muds, as well as for modeling flows on the scale of individual pores in the areas of cracks and joints of rocks with different filtration-capacitive characteristics. The main conclusion of the study is that the created collection of microfluidic chips is recommended for use in laboratory modeling of physical and chemical processes in the nearwellbore zone, as well as for testing the developed mathematical models and verifying numerical algorithms.

Keywords: microfluidics, porous media, core, scale modeling, methodology, algorithms

Acknowledgements: The research was carried out with the grant of the Russian Science Foundation no. 23-79-30022, https://rscf.ru/project/23-79-30022/

**For citation:** Yakimov A.S., Meshkova V.D., Guzey D.V., Pryazhnikov A.I., Minakov A.V. Development of a collection of micro-fluidic chips for studying multiphase flows in the oil and gas industry. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 5, pp. 17–28. DOI: 10.18799/24131830/2025/5/4732

#### Введение

Для нефтегазовой отрасли изучение течения многофазных потоков и исследование сложных физико-химических процессов, протекающих в пористых средах, играет очень важную роль, так как полученные знания в данной области позволяют оптимизировать имеющиеся технологии добычи углеводородного топлива, а также ложатся в основу для разработки новых.

Традиционно данные исследования осуществляются с использованием образцов керна нефтегазовой горной породы, но в силу непрозрачности образца и геометрической сложности природной пористой среды детальная визуализация течения и демонстрация процессов фильтрации/вытеснения в данном случае невозможна [1–3]. В связи с этим одним из немногих методов, позволяющих визуализировать микромасштабные процессы, протекающие в пористых средах, является использование микрофлюидных чипов, имитирующих структуру горной породы [4–7].

Внешне микрофлюидный чип является прозрачным образцом, воспроизводящим пористую сеть в 2D-плоскости, что позволяет наглядно демонстрировать динамику жидкости и оценить поведение флюида в пластовых условиях [8-10]. Основное преимущество применения микрофлюидного чипа заключается в том, что исследователь может сам воссоздавать необходимую топологию чипа под определенный класс задач, путем настройки их геометрических характеристик и свойств поверхности [11, 12]. Так, например, в работе [13] авторы использовали микрофлюидный чип для моделирования процесса вытеснения нефти пеной из трещины между породами с различной проницаемостью. Стоит отметить, что при разработке топологии чипа пористость и размер зерен можно задавать [14]. Также микрофлюидные чипы используют для проведения физико-химического анализа процесса осаждения асфальтенов в прискважинной зоне на зернах породы [15] и для исследования течений в трещинах ГРП [16]. В обзорных работах [17, 18] представлен глубокий анализ применения микромоделей и их описание для изучения течения в гетерогенных горных породах и трещинах.

Разработка микрофлюидных чипов осуществляется по технологии «лаборатория-на-чипе» (ЛНЧ) [19, 20]. Для изготовления микромоделей используют различные материалы, например, такие как: стекло, кварц, полиметилметакрилат (ПММА) и полидиметилсилоксан (ПДМС), а также кремний и пластик [21, 22]. Но наиболее химически устойчивый материал по отношению к нефтепродуктам – ПДМС [23]. В качестве альтернативного материала можно рассматривать эпоксидные составы. Данные материалы используются и для изготовления подложки чипа.

Суть технологии ЛНЧ заключается в том, что она позволяет изготавливать модель чипа послойно, путем образования углубленного узора, который покрывается сверху другой ровной пластиной, формируя капиллярную сеть на стыке пластин [24]. В связи с этим ПДМС является наиболее применимым материалом для решения данного класса задач, так как позволяет создавать пластины, на которых можно формировать микроструктуру с отношением высоты к ширине равным до 5:1 с точностью 100 нм.

Кроме выбора материала, из которого будет изготовлен чип, необходимо подобрать метод, с помощью которого будет реализован процесс формирования узора. В научной практике таких методов существует достаточно много, но основными из них являются: метод фотолитографии, фрезерования, а также метод лазерной абляции [25–27].

Для получения узора методов фотолитографии необходимо на обрабатываемую поверхность нане-

сти фоторезистивный материал, который при засветке ультрафиолетом начнет менять свои свойства. Далее поверхность обрабатывается проявителем, и с поверхности удаляется засвеченный либо не засвеченный фоторезистор. Происходит формирование канализированного узора из фоторезистора путем поляризации поверхности. Таким образом, удается получить структуры с высоким аспектным отношением (до 10:1) [25].

Метод фрезерования можно отнести к методам, позволяющим быстро прототипировать микрофлюидные устройства, так как реализация метода заключается в механической обработке материала в результате его резанья фрезой. Максимальное аспектное отношение определяется длиной фрезы и ее диаметром, для стандартных фрез этот параметр составляет 4:1 [26]. В качестве альтернативного метода для быстрой разработки чипа может применяться метод лазерной абляции. Принцип действия метода схож с принципом метода фрезерования, только удаление вещества происходит под воздействием лазерного импульса. Данный метод позволяет формировать структуры с аспектное отношение до 2:1 за один проход [27].

Обзор работ показал, что микрофлюидные чипы могут эффективно применяться при гидродинамических исследованиях в различных отраслях науки и технологиях. Методов создания микрофлюидных чипов в настоящее время известно достаточно много. Выбор конкретного метода изготовления является нетривиальной задачей и напрямую зависит от материала, из которого планируется изготовить чип, и условий микрофлюидного эксперимента. Данная работа посвящена описанию методики разработки микрофлюидных чипов и созданию коллекции чипов-моделей для научно-исследовательских задач нефтегазовой индустрии.

#### Описание методики разработки микрофлюидных чипов

Методика, на основе которой разрабатываются микрофлюидные чипы, имитирующие различные горные породы, состоит из трех основных этапов. На *первом этапе* получают топологию микрофлюидного чипа; на *втором этапе* разрабатывают численную модель чипа и выполняют численные исследования, в ходе которых определяют его фильтрационно-емкостные свойства, затем выполняется анализ результатов и осуществляется оптимизация топологии. На *третьем этапе* изготавливается микрофлюидный чип уже с оптимизированной топологией. Ниже представлено подробное описание реализации каждого этапа.

#### Разработка топологии микрофлюидного чипа

*На первом этапе* строится топология пористого тела, которая имитирует структуру горной породы.

В качестве примера рассматривается топология, полученная в результате заполнения чаши Петри суспензией наноалмазов. В результате естественного высыхания рассматриваемой суспензии происходит образование случайной формы уникального узора, который теоретически подобен структуре горной породы. В итоге получаются плоские изображения сформированной структуры.

Получившиеся растровые изображения в виде фотографий необходимо преобразовать в векторную модель представления. Данная операция выполняется с помощью графического редактора Inkscape. Результатом векторизации станет набор замкнутых контуров, повторяющих очертания непрозрачных ячеек растрескавшейся наноалмазной пленки.

## Расчетные исследования по оптимизации топологий микрофлюидных чипов

На втором этапе выполняются расчетные исследования по определению фильтрационноёмкостных свойств, разрабатываемых микрофлюидных чипов, а также корректируются их геометрические характеристики и проектируются системы микроканалов для подвода и отвода жидкости.

Численное исследование выполнялось с помощью математической модели однофазного течения вязкой жидкости Навье–Стокса с постоянными значениями динамической вязкости и плотности.

Движение жидкости описывается уравнениями Навье–Стокса для несжимаемой среды:

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0,$$

$$\rho \left( \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \left( \mathbf{u} \cdot \nabla \right) \mathbf{u} \right) = -\nabla p + \nabla \cdot \left( 2\mu \mathbf{S} \right),$$

где и – вектор скорости; р – динамическое давление;  $\mathbf{S} = 0.5(\nabla \mathbf{u} + \nabla \mathbf{u}^T)$  – тензор скоростей деформации;  $\mu$  – динамическая вязкость;  $\rho_{\infty}$  – плотность среды.

Численный алгоритм базируется на методе конечного объема для неструктурированной сетки. Для получения балансных соотношений метода конечных объемов выполняется интегрирование дифференциальных уравнений по объему ячейки со сведением объёмных интегралов к интегралам по поверхности контрольного объёма. В качестве среднего значения по объему принимается значение в центре ячейки, а в качестве среднего значения на грани – значения в геометрическом центре грани. Градиенты сеточных полей в центре ячейки строятся на основе метода наименьших квадратов.

Решение исходной системы уравнений решается последовательно. На каждом временном шаге выполняется несколько глобальных итераций, связывающих поля скорости, давления. Представленная математическая модель была реализована в программном модуле «PoreFlow» на базе отечественного программного комплекса «SigmaFlow» [28]. Программный комплекс «SigmaFlow» ранее тестировался на большом количестве задач капиллярной гидродинамики и теплообмена [29–31]. Было продемонстрировано хорошее согласие с имеющимися экспериментальными данными как по локальным характеристикам течения (форма профиля скорости и температуры, полученная micro-PIV и LIF измерениями), так и по интегральным параметрам (коэффициенты сопротивления и теплоотдачи).

В ходе многочисленных исследований осуществляется оптимизация топологии чипакандидата до тех пор, пока не будут получены необходимые значения пористости и проницаемости, а также уточняются геометрические характеристики чипа и утверждается система микроканалов для подвода и отвода жидкости.

С помощью численного моделирования проводилась оптимизация топологии чипа-кандидата с целью получения необходимых значений пористости и проницаемости. Кроме того, с помощью расчетов также было выполнено проектирование системы микроканалов для подвода и отвода жидкости в микрочипе.

#### Изготовление микрофлюидных чипов

*На третьем этапе* выполняется изготовление микрофлюидного чипа с оптимизированной топологией.

Для изготовления модели-чипа был выбран ПДМС как популярный и достаточно изученный материал для изготовления микрофлюидных чипов с высоким аспектным отношением и субмикронным разрешением, для которого известны различные технологии микроформовки, герметизации и модификации поверхности. Часть используемых технологий описана ниже.

Изготовление модели-чипа начиналось с того, что на кремниевую монокристаллическую пластину диаметром 100 мм и толщиной 525 мкм наносился позитивный фоторезист ФП-383, после чего высушивался в соответствии с инструкцией производителя и помещался в установку лазерного экспонирования  $\mu$ PG 101 (Heidelberg, Германия). После экспонирования фоторезист проявлялся, оголяя кремний в местах будущих возвышенностей (на негативной мастер-форме соответствуют каналам чипов) (рис. 4, п. 3).

Далее пластинка обрабатывалась в СВЧ-плазме низкого давления в среде аргона с целью очистки поверхности оголившегося кремния от остатков проявителя и для обеспечения высокой адгезии при осаждении хрома. Затем пластинка помещалась в установку термовакуумного осаждения Auto 500 RF Boc (Edwards) напротив тигля с расплавом хрома при давлении 6,4 мТорр. Хром плавился с помощью электронного пучка, происходило его испарение и осаждение на все поверхности, которые были расположены напротив тигля, в том числе на образце. Контроль толщины осаждения приводился по прозрачности контрольного покровного стекла в автоматическом режиме. Толщина напыления составляла 50 нм и была нанесена примерно за 1 час на всю поверхность образца, включая проявленные и непроявленные области: на кремний и фоторезист.

Если растворить фоторезист, то и слой хрома над ним будет удален. При этом связанная с кремнием хромовая маска останется и будет надежно защищать поверхность в процессе дальнейшего травления. Данный процесс называется «Lift-off» («взрывом»). «Взрыв» фоторезиста производился в диметилсульфоксиде, нагретом до 80–85 °С. Для увеличения эффективности данный процесс сопровождается ультразвуковой обработкой до полного удаления фоторезиста в течение нескольких часов.

Далее происходило анизотропное травление пластинки высокоэнергетичными ионами по Bosch-процессу при комнатной температуре. Проектная глубина травления 40 мкм. После травления была измерена фактическая глубина на профилометре XP-1 (AMBiOS technology) в различных областях пластинки: 36,042; 34,399; 35,883 мкм.

Стоит отметить, что кремний имеет высокую адгезию к ПДМС, поэтому перед заливкой его необходимо было силанизировать. Силанизация производилась путем помещения образца в вакуумный эксикатор с несколькими каплями трихлорперфлюорооктилсилана на сутки. Капли полностью испарялись и конденсировались на всех поверхностях, в том числе на образце.

Заливка мастер-формы производилась двухкомпонентным силиконовым компаундом Sylgard 184 (DowCorning, США) (после полимеризации он превращается в ПДМС) в соответствии с инструкцией производителя. При этом компаунд дегазировался после замешивания и после заливки в мастерформу для удаления пузырей воздуха из внутренних углов мастер-формы. Полимеризация происходила при температуре 80 °C в течение четырёх часов. После чего канцелярским ножом ПДМС надрезался по периметру мастер-формы и извлекалась канализированная пластинка из ПДМС.

В местах подключения трубочек прорезались отверстия с помощью изготовленного из тупой иглы пробойника. Для этого края иглы диаметром 1 мм затачивались снаружи полировочной резинкой и убирался заусенец внутри твердосплавным стоматологическим буром. Для прочистки пробойника в иглу подавался воздух с помощью шприца. Очистка поверхности от частиц ПДМС после пробивания отверстий осуществлялась клейкой лентой Magic Scotch (3M, США). Затем производилась герметизация микрофлюидного чипа предметным стеклом.

Для этого стекло тщательно отмывалось в ацетоне, изопропаноле и дистиллированной воде. После чего высушивалось и обе пластинки (ПДМС и стекло) помещались в плазменную камеру оригинальной конструкции [32], где в разряжённой влажной атмосфере поджигался диэлектрический барьерный разряд и на поверхности пластин образовывались полярные силанольные и метанольные группы. После плазмления поверхности прикладывались друг к другу, и происходило их слипание. Для упрочнения соединения изготовленный чип выдерживался при температуре 125 °C в течение 15 минут. Эта температура катализировала реакцию образования ковалентных силоксановых связей из водородных силанольных.

#### Результаты исследования и их обсуждения

Для изучения сложных физико-химических процессов в интересах нефтегазовой отрасли были разработаны различные топологии прототипов микрофлюидных чипов. Так, была воспроизведена серия чипов-моделей, имитирующих горную породу. Данный вид чипов необходим для проведения сравнительных экспериментов при тестировании разрабатываемых математических моделей и верификации реализованных в них численных алгоритмов. Были разработаны топологии чипов, с помощью которых моделировались физико-химические процессы, протекающие в просквожённой зоне. Особое внимание было уделено созданию топологий, направленных на изучение течения жидкости в зоне трещины гидроразрыва пласта и буровых растворов, а также для моделирования течений на масштабе отдельных пор в районах трещин и стыков пород с разными фильтрационно-емкостными характеристиками.

В результате была разработана коллекция топологий микрофлюидных чипов, которая представлена на рис. 1.

Каждая топология, представленная в коллекции, была разработана для решения конкретных задач. Так, например, *Топология № 1* разрабатывалась для исследования процесса вытеснения нефти заводнением (рис. 1, *a*). Длина чипа порядком 3220 мкм, для увеличения сопротивления трещины на границе двух сред ширина трещины составляла 70 мкм. Пористость обеих половин сформирована заполнением с симметрией четвертого порядка квадратами, расстояние между которыми равно стороне 40 мкм для одной половины и 80 мкм для другой.

Трещины в породе могут иметь иерархию, то есть зерна породы тоже имеют микро- и даже

нанопористость. Для исследования вытеснения нефти из более мелких пор в присутствии достаточно широкого протока рядом (аналог байпаса) была спроектирована серия топологий, которые в коллекции объедены в *Топологию № 2* (рис. 1, *б*). В отличие от *Топологии № 1* в них есть пустые зоны до и после активной структуры, а квадраты и оси симметрии расположены по диагонали к основному направлению потока для уменьшения эффекта выделенного направления потока. Пористость и проницаемость варьировалась с помощью размеров зерен и расстояния между ними. Для одного из таких вариантов также была проварьирована ширина щели: 141; 40; 30, 123; 40; 20, 127; 30; 30, 85; 30; 3, 42; 30; 30 мкм.

Для моделирования осаждения асфальтенов в прискважинной зоне была разработана Топология № 3 (рис. 1, в). Для получения данной топологии было произведено расчетное уплотнение виртуальной засыпки в объеме. В результате этого расчета была получена объемная модель виртуального пористого тела и одно из сечений этого тела стало прототипом данной топологии. Для получения Топологии № 4 было произведено расчетное уплотнение виртуальной засыпки в объёме. В результате этого расчета была получена объемная модель виртуального пористого тела, и одно из сечений этого тела стало прототипом данной топологии (рис. 1, г). Данная топология имитирует горную пароду для исследования задач вытеснения нефти.

Ранее было описано, что для разработки микрофлюидных чипов используется способ построения пористых тел путем векторизации растровых изображений, именно данный подход был реализован для построения Топологий № 5–7. Топология № 5 была основана на векторизованном изображении суспензии наноалмазов, растрескавшейся в процессе высыхания (рис. 1, д). Топология № 6 основана на использовании диаграммы Вороного (рис. 1, е), где ширина каналов в породе составляла 25 мкм, а в проппанте – 60 мкм. Топология № 7 была получена на основе периодического заполнения плоскости шарами с порядком симметрии равным шести, ø зерен в области модельного пропанта 300 мкм, расстояние между зернами 100 мкм; ø зерен в области породы 50 мкм расстояние между зернами 10 мкм (рис. 1, ж). Данные топологии были разработаны для модели трещин ГРП. Важной деталью является то, что проницаемость модельной горной породы ниже проницаемости модельного проппанта, заполняющего тело самой трещины.

При разработке *Топологии* № 8 за основу было взято изображение высушенной на стеклянной чашке Петри суспензии взрывных наноалмазов (рис. 1, 3). При высыхании образовывалась тонкая пленка, которая растрескивалась. Отличительной особенностью данного объекта является то, что края образующихся в процессе растрескивания чешуек не отрываются от поверхности стекла и таким образом остаются в одной фокальной плоскости, и при фотографировании получается изображение удовлетворительной резкости с четкими краями чешуек.



Collection of microfluidic chip topologies for solving problems in the oil and gas industry Fig. 1.

Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2025. Т. 336. № 5. С. 17–28 Якимов А.С. и др. Разработка коллекции микрофлюидных чипов для изучения многофазных потоков в задачах...



растрескавшейся в процессе высыхания

Рис. 2. Результаты численного моделирования однофазного течения в микрофлюидных чипах разной топологии

Fig. 2. Results of numerical simulation of single-phase flow in microfluidic chips of various topologies

Для разрабатываемых микрофлюидных чиповмоделей горных пород было проведено численное исследование по определению фильтрационноемкостных свойств. С помощью моделирования была исследована структура течения в микрофлюидных чипах. Численные исследования выполнялись для воды со следующими физическими свойствами: плотность  $\rho$ =998 кг/м<sup>3</sup>, динамическая вязкость  $\mu$ =0,001 Па·с. На входе в расчетную область задавалось значение скорости потока v=1,25·10<sup>-3</sup> м/с. На выходе из расчетной области рассматриваются условия нулевого давления.

В ходе проведенных расчетов были доработаны топологии, определены значения проницаемости разрабатываемых микрофлюидных чипов. Далее приведены результаты расчетов для итоговых топологий некоторых моделей коллекции микрофлюидных чипов. Результаты представлены в виде полей скорости и давления (рис. 2).

По результатам проведенных численных исследований были определены фильтрационно-

Микрофлюидный чип, моделирующий трещину на границе двух пластов

Микрофлюидный чип для моделирования осаждения

асфальтенов в прискважинной зоне

емкостные свойства разрабатываемых микрофлюидных чипов – моделей горных пород. Значения пористости и проницаемости некоторых микрофлюидных чипов приведены в таблице.

Таблица.	Значения	пористости	и	проницаемости
	микрофлюидных чипов			

 Table.
 Porosity and permeability values of microfluidic chips

Топология	Пористость	Проницаемость
Topology	Porosity, %	Permeability, Д
1	82,94	61,99
2	82,94	61,99
5	44,97	287,52
6	25,79	235,75
8	31.44	209.35

На основе разработанных топологий (рис. 1) были изготовлены микрофлюидные чипы из ПДМС. На рис. 3 для примера представлены готовые чипы, заполненные нефтью и водой.



Микрофлюидный чип для моделирования вытеснения нефти через щель между двумя проницаемыми телами



Микрофлюидный чип имитации горной породы для исследования задач вытеснения нефти



Микрофлюидные чипы для исследования течений в ГРП

**Рис. 3.** Изготовленные микрофлюидные чипы из ПДМС **Fig. 3.** Fabricated microfluidic chips from polydimethylsiloxane

#### Заклчение

В качестве основных выводов необходимо выделить следующие:

- 1. Представлено описание разработки дизайн микрофлюидных чипов-моделей горных пород с различной проницаемостью и характеристиками смачиваемости для задач нефтевытеснения.
- Созданы расчетные модели разработанных топологий микрофлюидных чипов. С помощью численного моделирования определены фильтрационно-емкостные свойства разрабатываемых микрофлюидных чипов, а также уточнены геометрические характеристики их топологий и подводящих каналов.
- Предложены и апробированы на практике новые алгоритмы построения искусственных топологий пористых тел с изотропными и анизотропными характеристиками проницаемости, а также адаптирована методика оцифровки натуральных изображений для получения на их основе топологий микрофлюидных чипов.
- 4. На основе полученных топологий были изготовлены кремниевая и полимерная мастер-

формы методами фотолитографии и стереолитографии для заливки чипов из ПДМС.

5. Создана коллекция готовых к дальнейшим экспериментам микрофлюидных чипов-моделей горных пород с различной проницаемостью и характеристиками смачиваемости. Разработанные топологии рекомендовано использовать при выполнении сравнительных экспериментов для тестирования разрабатываемых математических моделей и верификации численных алгоритмов, а также для лабораторного моделирования физикохимических процессов в прискважинной зоне.

В целом микрофлюидные чипы, имитирующие горные породы, широко используются в научноисследовательских задачах нефтегазовой индустрии. Представленная в работе методика разработки микрофлюидных чипов позволяет создать уникальные, различные по своей структуре топологии чипов, с помощью которых становится возможным изучение множества различных физикохимических процессов, понимание и изучение которых необходимо для разработки новых эффективных методов увеличения нефтеотдачи.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Применение микрофлюидики для оптимизации технологий разработки нефтегазовых месторождений / Д.И. Перепонов, А. Щербакова, В.В. Казаку, М.Э. Гаджиев, М.А. Тархов, Е.Д. Шилов, А.Н. Черемисин // Вестник нефтегазовой отрасли Казахстана. 2023. Т. 5. № 1. С. 57–73. DOI: 10.54859/kjogi108639.
- 2. Стулов П.А., Егоров А.А., Гавриленко Т.В. Современные технологии создания модели порового пространства горных пород // Вестник кибиренетики. 2019. № 1. С. 47–54.
- 3. Application of microfluidics in chemical oil recovery: a review / Mahmoud Fani, Peyman Pourafshari, Peyman Mostaghimi, Nader Mosawat // Fuel. 2022. Vol. 315.
- 4. Review of microfluidic devices and imaging techniques for studying fluid flow in porous geomaterials / A. Jahanbakhsh, Ch.L. Wlodarczyk, D.P. Hand, R.R.J. Mayer, M.M. Maroto-Valer // Sensors. 2020. Vol. 20 P. 20–14.
- A microfluidic approach to water-rock interactions using thin rock sections: Pb and U sorption on thin sections of shale and granite / Young Soo Oh, Ho Young Jo, Ji-Hun Ryu, Geon-Young Kim // Hazardous Materials Log. – 2017. – Vol. 324. – P. 373–381.
- Jerry Joseph, Naga Shiva Kumar Gunda, Sushanta K. Mitra. Porous media on chip: porosity and permeability measurements // Chemical-technological science. – 2013. – Vol. 99. – P. 274–283.
- 7. Massimani A. Methodology, validation, etc. Design, fabrication and experimental validation of microfluidic devices for studying pore phenomena in underground gas storage systems // Micromachines (Basel). 2023. Vol. 14. № 2. P. 2–14.
- 8. Songqi Li, Yuetian Liu et al. Experimental study on the pore mechanism for improving displacement efficiency by low salinity water flooding using reservoir on a chip // ASU Omega. 2021. Vol. 6. T. 32. P. 20984–20991.
- 2D microfluidic devices for studying pore phenomena: a review / A. Massimiani, F. Panini, S.L. Marasso, M. Cocuzza, M. Quaglio, C.F. Pirri, F. Verga, D. Viberti // MDPI. Water. – 2023. – Vol. 15. – № 6. – P. 2–19.
- Filimonov S., Pryazhnikov M., Pryazhnikov A. Network modeling of two-phase flows in a microfluidic chip // E3S Conference Network. – 2023. – Vol. 397. – P. 01007.
- 11. Olaywola Saheed, Dejam M. A comprehensive review of low salinity nanoparticle interactions with surfactants for enhanced oil recovery in sandstone and carbonate reservoirs // Fuel. 2019. Vol. 241 P. 1045–1507.
- Fabrication and application of microfluidic devices: a review / A.-G. Niculescu, C. Kirkov, A.C. Birca, A.M. Grumezescu // Int J Mol Sci. – 2021. – Vol. 22. – № 4. – P. 1045–1057.
- 13. Conn S.A. et al. Visualization of oil displacement by foam in a microfluidic device with permeability contrast // Laboratory on a chip. 2014. Vol. 14. № 20. P. 3968–3977.
- Kelly S.A., Torres-Verdin K., Balhoff M.T. From surface to substrate: two-scale micro/nanofluidic networks for studying transport anomalies in dense porous media // Laboratory on a chip. – 2016. – Vol. 16. – P. 2829–2839.
- Mark D., Heberle S., Roth G. Microfluidic «labs on a chip»: requirements, characteristics and applications // Chemical Society Reviews. – 2010. – Vol. 39 – P. 1153–1182.
- Pagan Pagan N.M. et al. Physico-chemical characterization of asphaltenes using microfluidic analysis // Chemical Reviews. 2022. – Vol. 122. – № 7. – P. 7205–7235.
- 17. A review of development methods and EOR technologies for carbonate reservoirs / Z.X. Xu, S.Y. Li, B.F. Li et al // Pet Sci. 2020. Vol. 17. № 4. P. 990–1013. DOI: 10.1007/s12182-020-00467-5.
- 18. Petrostep ME-2. Flowback aid. URL: https://www.stepan.com/content/dam/stepan-dot-com/webdam/website-product-documents/literature/oilfield/Copy-of-Copy-of-ME-2\_Final.pdf (дата обращения 15.05.2024).

- 19. Perdigones F. Lab-on-PCB and flow driving: a critical review // Micromachines (Basel). 2021 Feb 10. Vol. 12 (2):175. DOI: 10.3390/mi12020175
- Lab-on-PCB review for biomedical applications / W. Zhao, S. Tian, L. Huang, K. Liu, L. Dong // Electrophoresis. 2020. Vol. 41. – P. 1433–1445.
- Применение микрофлюидики для оптимизации технологий разработки нефтегазовых месторождений / Д.И. Препонов, А. Щербакова, В.В. Казаку, М.Э. Гаджиев, М.А. Тархов, Е.Д. Шилов, А.Н. Черемисин // Вестник нефтегазовой отрасли Казахстана. – 2023. – № 1. – С. 57–73.
- 22. Low-Cost Accessible Fabrication Methods for Microfluidics Research in Low-Resource Settings / Hoang-Tuan Nguyen, Ha Thach, Emmanuel Roy et al. // Micromachines. 2018. Vol. 9. P. 1–10. DOI: 10.3390/mi9090461.
- 23. Ríos Á., Zougagh M., Avila M. Miniaturization through lab-on-a-chip: Utopia or reality for routine laboratories. A review // Analytica Chimica Acta. 2012. Vol. 740. P. 1–11.
- 24. Lab-on-a-chip devices: how to close and plug the lab / Y. Temiz, R.D. Lovchik, G.V. Kaigala, E. Delamarche // Microelectronic Engineering. 2015. Vol. 132. P. 156–175. DOI: 10.1016/j.mee.2014.10.013.
- 25. Особенности формирования микроструктур с высоким аспектным соотношением при изготовлении полимерных микрофлюидных чипов для исследования единичных живых клеток in vitro / А.С. Букатин, И.С. Мухин, Е.И. Малышев, И.В. Кухтевич, А.А. Евстрапов, М.В. Дубина // Журнал технической физики. 2016. Т. 86. № 10. С. 125–130.
- 26. Research of replication accuracy in some elastomer materials with different Young's modulus / N.N. Germash, N.A. Esikova, P.K. Afonicheva, A.A. Evstrapov // International Conference PhysicA. St Petersburg, 18–22 October 2021. Vol. 2103. № 012054. P. 1–7. DOI: 10.1088/1742-6596/2103/1/012054.
- 27. Микрофлюидные чипы из полиметилметакрилата: метод лазерной абляции и термического связывания / А.А. Евстрапов, Т.А. Лукашенко, С.Г. Горный, К.В. Юдин // Научное приборостроение. – 2005. – Т. 15. – № 2. – С. 72–81.
- 28. Свободно распространяемый программный комплекс SIGMA\_FW для моделирования гидродинамики и теплообмена / А.А. Дектерев, К.Ю. Литвинцев, А.А. Гаврилов, Е.Б. Харламов, С.А. Филимонов // Журнал Сибирского федерального университета. 2017. Т. 10. № 4. С. 534–542.
- 29. Минаков А.В., Лобасов А.С., Дектерев А.А. Моделирование гидродинамики и конвективного теплообмена в микроканалах // Вычислительная механика сплошных сред. 2012. Т. 5. № 4. С. 481–488.
- 30. Micro-LIF and numerical investigation of mixing in microchannel / Minakov A.V., Yagodnitsina A.A., Lobasov A.S., Rudyak V.Y., Bilsky A.V. // Журнал СФУ, серия: техника и технологии. 2013. Т. 6. № 1. С. 15–27.
- 31. Рудяк В.Я., Минаков А.В. Современные проблемы микро- и нанофлюидики. Новосибирск: Наука, 2016. 296 с.
- 32. Плазменная камера для активации поверхности микрофлюидных чипов и их последующей герметизации: пат. № 2814689, Российская федерация, С1; заявл. 06.10.2023, опубл. 04.03.2024. Бюл. № 7. 11 с.

#### Информация об авторах

**Антон Сергеевич Якимов**, младший научный сотрудник научно-исследовательской части Сибирского федерального университета, Россия, 660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79. asyakimov@gmail.com; https://orcid.org/000-0003-4919-9877

**Виктория Дмитриевна Мешкова**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник научноисследовательской части Сибирского федерального университета, Россия, 660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79. Vredel@sfu-kras.ru

**Дмитрий Викторович Гузей**, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник научно-исследовательской части Сибирского федерального университета, Россия, 660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79. gudimas@yandex.ru

**Андрей Иванович Пряжников**, младший научный сотрудник научно-исследовательской части Сибирского федерального университета, Россия, 660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79. arrivent@yandex.ru; https://orcid.org/0000-0002-6124-037X

**Андрей Викторович Минаков**, доктор физико-математических наук, директор Института инженерной физики и радиоэлектроники Сибирского федерального университета, Россия, 660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79. tov-andrey@yandex.ru

Поступила в редакцию: 13.06.2024 Поступила после рецензирования: 05.09.2024 Принята к публикации: 02.04.2025

#### REFERENCES

- 1. Pereponov D.I., Shcherbakova A., Kazaku V.V., Gadzhiev M.E., Tarkhov M.A., Shilov E.D., Cheremisin A.N. Application of microfluidics to optimize oil and gas field development technologies. *Bulletin of the oil and gas industry of Kazakhstan*, 2023, vol. 5, no. 1, pp. 57–73. (In Russ.) DOI: 10.54859/kjogi108639.
- 2. Stulov P.A., Egorov A.A., Gavrilenko T.V. Modern technologies for creating models of rock pore space. *Bulletin of cybernetics*, 2019, vol. 1, no. 33, pp. 47–54. (In Russ.)
- 3. Mahmoud Fani, Peyman Pourafshari, Peyman Mostaghimi, Nader Mosawat. Application of microfluidics in chemical oil recovery: a review. *Fuel*, 2022, vol. 315, pp. 1–10.
- 4. Jahanbakhsh A., Wlodarczyk Ch.L., Hand D.P., Mayer R.R.J., Maroto-Valer M.M. A review of microfluidic devices and imaging techniques for studying fluid flow in porous geomaterials. *Sensors*, 2020, vol. 20, no. 14, pp. 20–14.

- 5. Young Soo Oh, Ho Young Jo, Ji-Hun Ryu, Geon-Young Kim. A microfluidic approach to water-rock interactions using thin rock sections: Pb and U sorption on thin sections of shale and granite. *Hazardous Materials Log*, 2017, vol. 324, pp. 373–381.
- 6. Jerry Joseph, Naga Shiva Kumar Gunda, Sushanta K. Mitra. Porous media on chip: porosity and permeability measurements. *Chemical-technological science*, 2013, vol. 99, pp. 274–283.
- 7. Massimani A. Methodology, validation, etc. Design, fabrication and experimental validation of microfluidic devices for studying pore phenomena in underground gas storage systems. *Micromachines (Basel)*, 2023, vol. 14, no. 2, pp. 2–14.
- 8. Songqi Li, Yuetian Liu. Experimental study on the pore mechanism for improving displacement efficiency by low salinity water flooding using reservoir on a chip. ASU Omega, 2021, vol. 6, no. 32, pp. 20984–20991.
- 9. Massimani A., Panini F., Marasso S.L. 2D microfluidic devices for studying pore phenomena: a review. *MDPI. Water*, 2023, vol. 15, no. 6, 1222.
- 10. Filimonov S., Pryazhnikov M., Pryazhnikov A. Network modeling of two-phase flows in a microfluidic chip. *E3S Conference Network*, 2023, vol. 397, 01007.
- 11. Olaywola Saheed, Dejam M. A comprehensive review of low salinity nanoparticle interactions with surfactants for enhanced oil recovery in sandstone and carbonate reservoirs. *Fuel*, 2019, vol. 241. pp. 1045–1507.
- Niculescu A.-G., Kirkov C., Birca A.C., Grumezescu A.M. Fabrication and application of microfluidic devices: a review. Int J Mol Sci, 2021, vol. 22, no. 4, pp. 2–26.
- 13. Conn S.A. Visualization of oil displacement by foam in a microfluidic device with permeability contrast. *Laboratory on a chip*, 2014, vol. 14, pp. 3968–3977.
- 14. Kelly S.A., Torres-Verdin K., Balhoff M.T. From surface to substrate: two-scale micro/nanofluidic networks for studying transport anomalies in dense porous media. *Laboratory on a chip*, 2016, vol. 16, no. 15, pp. 2829–2839.
- 15. Mark D., Heberle S., Roth G. Microfluidic "labs on a chip": requirements, characteristics and applications. *Chemical Society Reviews*, 2010, vol. 39, pp. 1153–1182.
- 16. Nataira M. Pagan Pagan. Physico-chemical characterization of asphaltenes using microfluidic analysis. *Chemical Reviews*, 2022, vol. 122, no. 7, pp. 7205–7235.
- 17. Xu Z.X., Li S.Y., Li B.F. A review of development methods and EOR technologies for carbonate reservoirs. *Pet Sci.*, 2020, vol. 17, no. 4, pp. 990–1013. DOI: 10.1007/s12182-020-00467-5.
- Petrostep ME-2. Flowback aid. Available at: https://www.stepan.com/content/dam/stepan-dot-com/webdam/website-productdocuments/literature/oilfield/Copy-of-Copy-of-ME-2\_Final.pdf. Accessed 12/10/2023 (accessed 15 May 2024).
- 19. Perdigones F. Lab-on-PCB and flow driving: a critical review. *Micromachines (Basel)*, 2021 Feb 10, vol. 12(2):175. DOI: 10.3390/mi12020175
- 20. Zhao W., Tian S., Huang L., Liu K., Dong L. Lab-on-PCB review for biomedical applications. *Electrophoresis*, 2020, vol. 41, pp. 1433–1445.
- Preponov D.I., Shcherbakova A., Kazaku V.V., Gadzhiev M.E., Tarkhov M.A., Shilov E.D., Cheremisin A.N. Application of microfluidics for optimization of oil and gas field development technologies. *Bulletin of the oil and gas industry of Kazakhstan*, 2023, vol. 1, pp. 57–73. (In Russ.)
- 22. Hoang-Tuan Nguyen, Ha Thach, Emmanuel Roy. Low-cost accessible fabrication methods for microfluidics research in low-resource settings. *Micromachines*, 2018, vol. 9, pp. 1–10. DOI: 10.3390/mi9090461.
- 23. Ríos Á., Zougagh M., Avila M. Miniaturization through lab-on-a-chip: Utopia or reality for routine laboratories. A review. *Analytica Chimica Acta*, 2012, vol. 740, pp. 1–11.
- 24. Temiz Y., Lovchik R.D., Kaigala G.V., Delamarche E. Lab-on-a-chip devices: how to close and plug the lab. *Microelectronic Engineering*, 2015, vol. 132, pp. 156–175.
- 25. Bukatin A.S., Mukhin I.S., Malyshev E.I., Kukhtevich I.V., Evstrapov A.A., Dubina M.V. Features of the formation of microstructures with a high aspect ratio in the manufacture of polymer microfluidic chips for the study of single living cells in vitro. *Journal of Technical Physics*, 2016, vol. 86, no. 10, pp. 125–130. (In Russ.)
- Germash N.N., Esikova N.A., Afonicheva P.K., Evstrapov A.A. Research of replication accuracy in some elastomer materials with different Young's modulus. *International Conference PhysicA*. Saint Petersburg, Russia, 18–22 October 2021. Vol. 2103, no. 012054, pp. 1–7.
- 27. Evstrapov A.A., Lukashenko T.A., Gorny S.G., Yudin K.V. Microfluidic chips made of polymethyl methacrylate: laser ablation and thermal bonding method. *Scientific Instrument-making*, 2005, vol. 15, no. 2, pp. 72–81. (In Russ.)
- 28. Dekterev A.A., Litvintsev K.Yu., Gavrilov A.A., Kharlamov E.B., Filimonov S.A. Freely distributed software package SIGMA\_FW for modeling hydrodynamics and heat transfer. *Journal of the Siberian Federal University*, 2017, vol. 10, no. 4, pp. 534–542. (In Russ.)
- 29. Minakov A.V., Lobasov A.S., Dekterev A.A. Modeling of hydrodynamics and convective heat transfer in microchannels. *Computational mechanics of continuous media*, 2012, vol. 5, no. 4, pp. 481–488. (In Russ.)
- 30. Minakov A.V., Yagodnitsina A.A., Lobasov A.S., Rudyak V.Y., Bilsky A.V. Micro-LIF and numerical investigation of mixing in microchannel. *Journal SFU, series: equipment and technology*, 2013, vol. 6, no. 1, pp. 15–27.
- 31. Rudyak V.Ya., Minakov A.V. Modern problems of micro- and nanofluidics. Novosibirsk, Nauka Publ., 2016. 296 p. (In Russ.)
- 32. Yakimov A. Plasma chamber for activation of the surface of microfluidic chips and their subsequent sealing. Patent RF no. 2814689, 2024. (In Russ.)

#### Information about the authors

**Anton S. Yakimov**, Junior Researcher, Siberian Federal University, 79, Svobodny avenue, Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation. asyakimov@gmail.com; https://orcid.org/0000-0003-4919-9877.

**Victoria D. Meshkova**, Cand. Sc., Senior Researcher, Siberian Federal University, 79, Svobodny avenue, Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation. Vredel@sfu-kras.ru **Dmitry V. Guzey**, Cand. Sc., Senior Researcher, Siberian Federal University, 79, Svobodny avenue, Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation. gudimas@yandex.ru

**Andrey I. Pryazhnikov**, Junior Researcher, Siberian Federal University, 79, Svobodny avenue, Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation. arrivent@yandex.ru; https://orcid.org/0000-0002-6124-037X

**Andrey V. Minakov**, Dr. Sc., Director of the Institute of Engineering Physics and Radioelectronics, Siberian Federal University, 79, Svobodny avenue, Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation. tov-andrey@yandex.ru

Received: 13.06.2024 Revised: 05.09.2024 Accepted: 02.04.2025 УДК 622.24.051 DOI: 10.18799/24131830/2025/5/4762 Шифр специальности ВАК: 2.8.1 Научная статья

### Влияние конструкции коронок, армированных резцами PDC, на отбор керна в мерзлых породах

### М.С. Попова1<sup>™</sup>, Б.В. Григорьев

<sup>1</sup> Югорский государственный университет, Россия, г. Ханты-Мансийск <sup>2</sup> Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, Россия, г. Якутск

#### <sup>™</sup>alleniram83@mail.ru

Аннотация. Актуальность. Инженерно-геологические изыскания – неотъемлемая часть горных работ различного назначения. Важное влияние на результаты инженерно-геологических изысканий оказывает качество отбора керновой пробы грунта. При этом получение керна мерзлых пород осложняется повышением температуры призабойной зоны, возникающим вследствие реализации процесса бурения. При повышении температуры изменяются физико-механические свойства мерзлых грунтов, что приводит к трансформации механизма их разрушения и повышению вероятности возникновения аварийных ситуаций бурения. Полученный в условиях повышения температуры керн не позволяет достоверно оценить свойства и строение грунтов в естественных условиях их залегания. Поэтому возникает необходимость разработки технологических и технических средств, способствующих сохранению температурного режима массива горных пород при механическом воздействии на него. Проведенный анализ условий колонкового бурения в мерзлых породах показал, что наряду с технологическими причинами на повышение температуры забоя оказывает влияние конструкция породоразрушающего инструмента. В статье раскрыта зависимость изменения температуры на забое скважины в процессе бурения от конструктивных особенностей колонкового породоразрушающего инструмента. Целью работы является исследование влияния конструктивных особенностей бурового колонкового инструмента на характер разрушения мерзлых грунтов, представленных рыхлыми осадочными горными породами, как наиболее подверженных изменению физико-механических свойств при повышении температуры. За основу исследования выбраны мерзлые грунты, слагающие разрез Якутии - крупного промышленного района, требующего для своего развития частого проведения инженерно-геологических изысканий. Объекты: конструкция колонкового бурового инструмента, механизм разрушения мерзлых горных пород, условия отбора керна в мерзлых грунтах. Методы: аналитический метод, экспериментальный метод, метод производственного испытания. Результаты. Определены основные направления разработки колонкового инструмента для качественного отбора проб керна в мерзлых грунтах. Выведена зависимость величины температурного прироста на забое скважины от ориентации и размеров резцов, армирующих породоразрушающий инструмент.

**Ключевые слова:** колонковый инструмент, коронка, бурение, мерзлые грунты, повышение эффективности бурения, отбор проб, керн, инженерно-геологические изыскания

**Для цитирования:** Попова М.С., Григорьев Б.В. Влияние конструкции коронок, армированных резцами PDC, на отбор керна в мерзлых породах // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 5. – С. 29–36. DOI: 10.18799/24131830/2025/5/4762

UDC 622.24.051 DOI: 10.18799/24131830/2025/5/4762 Scientific paper

## Impact of the design of crowns reinforced with PDC cutters on core sampling in frozen rocks

### M.S. Popova<sup>1⊠</sup>, B.V. Grigoriev<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Yugra State University, Khanty-Mansiysk, Russian Federation <sup>2</sup> M.K. Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russian Federation

<sup>™</sup>alleniram83@mail.ru

Abstract. Relevance. Engineering-geological surveys are an integral part of mining operations for various purposes. The quality of soil core sampling has an important impact on the results of engineering geological surveys. At the same time, obtaining a frozen rock core is complicated by an increase in the bottomhole zone temperature, which arises as a result of drilling. As the temperature rises, the physical and mechanical properties of frozen soils change, which leads to a transformation of the mechanism of their destruction and an increase in the likelihood of drilling emergencies. A core obtained under conditions of rising temperature does not allow for a reliably accurate assessment of the properties and structure of soils in their natural conditions. Therefore, there is a need to develop technological and technical means that help maintain the temperature regime of a rock mass under mechanical effect on it. The analysis of the conditions of core drilling in frozen rocks showed that, along with technological reasons, the design of the rock-cutting tool affects the increase in bottom-hole temperature. The article reveals the dependence of the temperature change at well bottom when drilling on the design features of the core rock-cutting tool. Aim. To study the impact of the design features of a drilling core tool on the nature of destruction of frozen soils, represented by loose sedimentary rocks as the most susceptible to changes in physical and mechanical properties with increasing temperature. The study was based on frozen soils that make up the section of Yakutia, a large industrial region that requires frequent geotechnical surveys for its development. **Objects.** Core drilling tool design, mechanism of frozen rocks destruction, conditions for core sampling in frozen soils. *Methods.* Analytical method, experimental method, production test method. *Results.* The authors have determined the main directions for the development of core tools for highquality core sampling in frozen soils. They derived the dependence of the magnitude of the temperature increase at well bottom on the orientation and size of the cutters reinforcing the rock-cutting tool.

**Keywords:** core tool, crown, drilling, frozen soils, increasing drilling efficiency, sampling, core, engineering and geological surveys

**For citation:** Popova M.S., Grigoriev B.V. Impact of the design of crowns reinforced with PDC cutters on core sampling in frozen rocks. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 5, pp. 29–36. DOI: 10.18799/24131830/2025/5/4762

#### Введение

Проведение инженерно-геологических изысканий в северо-восточной части Сибири является неотъемлемым, необходимым и постоянным этапом промышленных работ различного назначения в регионе. Это связано с особенностью строения верхней части земной коры и климатом данной Геологический территории. разрез северовосточной Сибири характеризуется сплошным распространением мерзлых грунтов, при этом в некоторых участках мощность мерзлой толщи может достигать 200 м. Мерзлый грунт – это, как правило, дисперсная, неоднородная горная порода, свойства которой определяются ее составом и могут изменяться в зависимости от состояния окружающей среды. Основной проблемой при любом механическом воздействии на мерзлые грунты является изменение их физико-механических свойств, вызванное повышением или понижением температуры. Тщательное изучение мерзлых грунтов позволяет избегать трудностей, возникающих при строительстве и в процессе ведения горно-геологических работ, составлять прогнозы эксплуатации промышленных объектов и возможных изменений природных условий, достигать необходимого эффекта при реализации производственных процессов, предвидеть и решать многие другие важные задачи, осваивать новые территории Сибири и т. д. [1-25].

Одним из важных этапов инженерногеологических изысканий является отбор проб керна. Причем надежность и уровень сложности проведения последующих этапов инженерно-геологических изысканий во многом зависит от качества и фактического выхода отобранной в процессе бурения пробы. Однако при бурении скважин в мерзлых породах возникает большое количество осложнений [20–25], которые зачастую перерастают в аварийные ситуации, а отбор керновой пробы в таких условиях дополнительно затрудняет обеспечение эффективной скорости проходки скважин.

Способность мерзлого грунта проявлять разные физико-механические свойства вследствие изменения температуры усложняет процесс бурения и отбор керна, в результате чего параметры полученной пробы могут быть искажены или не отвечать действительности.

На сегодняшний день существует много способов повышения продуктивности бурения в мерзлых горных породах. При этом проблема «растепления» мерзлых грунтов и возникновение осложнений, связанных с этим явлением, считается актуальной. Бурение скважин в мерзлых грунтах сопровождается образованием сальников, обрушением стенок скважины, нарушением направления траектории, а самое главное, что, безусловно, важно для результатов инженерно-геологических изысканий, потерей и нарушением керна.

Текущее состояние забоя в процессе бурения формируется из совокупности факторов, одним из которых является соответствие конструкции породоразрушающего инструмента горно-геологическим условиям. Данной теме посвящены известные научные труды [1, 10, 26, 27]. Наиболее простым, но действенным способом изменения геометрии породоразрушающего инструмента является смена типа резцов и регулирование их ориентации [1, 10, 26, 27]. Целью работы является определение влияния конструктивных параметров коронок на условия бурения и отбора керна в мерзлых грунтах, а именно возможности воздействия на температурный режим путем изменения конструкции режущей части коронок. В качестве задачи выбрана необходимость решения производственных проблем, возникающих при бурении ООО «МИП «Арктик-Бур», «Арктик Проект», «Алмазы Анабара» в мерзлых грунтах Якутии и связанных с таянием пород при их разрушении, за основу приняты результаты производственного бурения данных организаций.

#### Анализ производственных условий бурения в мерзлых грунтах

Состав и строение мерзлых горных пород весьма неоднороден и зачастую различен на разных участках территории Сибири. Согласно результатам геологических исследований, проведенных 000 «МИП «Арктик-Бур» И проектноизыскательской компанией «Арктик Проект», разрез территории Якутии до 12 м состоит из четвертичных отложений, представленных такими породами, как супеси, суглинки и пески, гравийногалечниковыми грунтами с песчаным заполнителем, в основном рыхлыми молодыми континентальными отложениями, находящимися в мерзлом состоянии. Температура начала замерзания данных грунтов находится в пределах от минус 0,2 до минус 0,15 °C. В мерзлом состоянии такие грунты ведут себя как устойчивые, прочные породы средней твердости. Так, согласно классификации категории пород по буримости мерзлые пески и глины относятся к IV-V категории. Криогенная текстура грунтов изученной территории массивная, тонкослоистая. Лед в глинистых грунтах присутствует в виде тонких (от 1-2 мм) горизонтальных прослойков.

При этом отмечается возможность залегания грунтов различной степени льдистости, что указывает на частое изменение физико-механических свойств исследуемого разреза.

Чем более дисперсным является мерзлый грунт, тем дольше время замерзания содержащейся в нем воды. При этом лед выступает прочной связью скелета мерзлых грунтов. В случае «растепления» грунты активно проявляют свойства пластичности, вязкости. Таким образом, поддержание отрицательных температур способствует повышению прочности, снижению пластичности мерзлого грунта и облегчает процесс бурения с отбором керна.

Анализ имеющихся геологических данных указывает на то, что исследование процесса разрушения мерзлых горных пород при бурении скважин должно учитывать особенности разреза, который может характеризоваться перемежаемостью слоев, частым изменением свойств горных пород, обводненностью, наличием льда и дисперсностью грунтов.

Известный опыт бурения [22, 25] показал, что преимущественно эффективным методом очистки скважин при бурении в мерзлых породах является применение в качестве очистного агента сжатого, сухого, охлажденного воздуха. В то же время даже в случае полного соблюдения условий бурения, при которых воздух попадает на забой необходимой температуры и влажности, «растепления» горной породы на забое избежать не удается. Источником повышения температуры выступает механическая работа породоразрушающего инструмента. Как известно, практически вся механическая энергия рассеивается в виде тепла. Таким образом, тепловой эффект является неизбежным фактором разрушения горных пород при бурении скважин.

#### Аналитическое исследование

Согласно исследованиям Б.Б. Кудряшова и А.М. Яковлева [28], прирост температуры на забое скважины ( $\Delta t_3$ ) зависит от величины забойной мощности и расхода воздуха, что аналитически можно представить в виде формулы (1):

$$\Delta t_3 = \frac{0.52N}{G},\tag{1}$$

где *N* – забойная мощность; *G* – расход воздуха.

Забойная мощность – мощность, затрачиваемая на разрушение горной породы с целью углубления скважины. Справедливо утверждать, что величина данного показателя во многом определяется параметрами состояния системы взаимодействия «породоразрушающий инструмент – горная порода».

Учитывая, что при инженерно-геологических изысканиях применяется преимущественно вращательный способ бурения скважин с отбором керна, забойную мощность можно представить в виде выражения (2):

$$N = M \cdot \omega = \frac{2\pi M n}{60} , \qquad (2)$$

где  $\omega$  – окружная скорость; M – крутящий момент инструмента.

При этом окружная скорость находится согласно выражению (3):

$$\omega = \frac{2\pi n}{60},\tag{3}$$

где *n* – частота вращения бурового инструмента.

Величина крутящего момента зависит от силы, которую оказывает буровой инструмент на забой, и плеча, на котором эта сила действует, что описывается формулой (4):

$$\mathbf{M} = F \cdot r, \tag{4}$$

где *F* – сила действия инструмента на забой; *r* – средний радиус буровой коронки.

Согласно анализу механизма разрушения горной породы буровым инструментом режущего типа, обладающим крупным резцом, сила F, определяющая величину крутящего момента, представляет собой не что иное, как тангенциальное усилие разрушения горной породы, приложенное к резцам инструмента,  $-F_{\rm T}$ . Для эффективного бурения сила F, приложенная к каждому резцу бурового инструмента, должна быть достаточной для разрушения горной породы ( $F_{\rm p}$ ) и преодоления сил трения резца о забой ( $F_{\rm rp}$ ). Тогда силу F можно определить из выражения (5) [1]:

$$F = F_{\rm p} + F_{\rm Tp} \,. \tag{5}$$

При этом силу, необходимую для преодоления трения бурового инструмента о горную породу, можно найти как произведение осевой нагрузки  $(P_{\rm oc})$  на коэффициент трения (f), согласно формуле (6):

$$F_{\rm TP} = P_{\rm oc} f \,. \tag{6}$$

Как правило, для отбора проб керна при инженерно-геологических изысканиях используются твердосплавные коронки. В таком случае сила, необходимая для разрушения горной породы резцом, определяется по известной формуле (7) [1]:

$$F_{\rm p} = \frac{\sigma_{\rm CK} h l(1 + tg\varphi)}{\sin \gamma_{\rm CK}},\tag{7}$$

где tg $\phi$  – коэффициент внутреннего трения; *h* – глубина внедрения резца в горную породу; *l* – ширина резца;  $\gamma_{c\kappa}$  – угол скалывания горной породы.

Отсюда следует, что забойную мощность можно представить в виде выражения (8):

$$N = \omega r N_{\rm p} \left( \frac{\sigma_{\rm CK} h l (1 + tg\varphi)}{\sin \gamma_{\rm CK}} + P f \right), \tag{8}$$

где *N*<sub>p</sub> – количество резцов коронки.

Тогда, подставив (8) в формулу (1), получим выражение, определяющее зависимость прироста температуры на забое от параметров механизма разрушения горной породы твердосплавным буровым инструментом (9):

$$\Delta t_3 = \frac{0.52\omega r N_{\rm p}(\frac{\sigma_{\rm CK} h l(1+tg\varphi)}{\sin\gamma_{\rm CK}} + Pf)}{G} \ . \tag{9}$$

Из выражения (9) видно, что помимо физикомеханических свойств горной породы ( $\sigma_{c\kappa}$ ,  $tg\varphi$ ,  $\gamma_{c\kappa}$ , f) и режимов бурения (P,  $\omega$ , G) на повышение температуры нагрева оказывают влияние глубина его заглубления (h) и конструктивные параметры бурового инструмента (r, l,  $N_p$ ). Из чего следует, что в изучаемой системе взаимодействия «породоразрушающий инструмент – горная порода» есть неуправляемые, управляемые и частично управляемые параметры, влияющие на тепловой режим работы бурового инструмента. Неуправляемыми являются свойства и характер залегания пород, горные условия бурения. К управляемым относятся режимы бурения, которые можно регулировать в процессе бурения. Геометрические параметры коронки могут быть заранее выбраны исходя из области применения инструмента. При этом возможный износ режущей части инструмента сложно достоверно и точно предсказать, поэтому данную группу параметров следует отнести к частично управляемым.

Учитывая основную роль трения в повышении температуры на забое, отдельное внимание следует уделять размеру площадки смятия горной породы, где, согласно ранее проведенным исследованиям [1, 27], возникают основные силы трения. Основываясь на анализе механизма разрушения горной породы твердосплавным резцом, помимо изменения ориентации, уменьшение ширины резца (l) позволяет снижать площадь смятия горной породы. Однако уменьшение ширины резца приводит к снижению прочностных показателей инструмента и его производительности. В любом случае преднамеренное применение инструмента с вооружением, снижающим размер площадки смятия горной породы режущей гранью, способствует снижению теплового прироста на забое в процессе бурения.

#### Анализ результатов производственного бурения

Согласно результатам производственного бурения Мирнинской ГРЭ, а также АО «Алмазы Анабара», твердосплавные коронки, такие, например, как СМ-5, ТК-10 и КТУ-2, при встрече с мерзлыми горными породами подвержены критическому износу (рис. 1, a), а коронки ТК-10 осуществляют разрушение породы с образованием крупных частиц шлама, что приводит к нарушению целостности керна.



**Рис. 1.** Износ коронок (а) СМ-5, (б) РДС в результате производственного бурения

Fig. 1. Bit (a) CM-5, (b) PDC wear as a result of production drilling

При этом применение в тех же условиях коронок, армированных резцами типа *PDC*, позволяет увеличить ресурс инструмента более чем в 3 раза (рис. 1). Однако, учитывая форму и размеры серийно-выпускаемых резцов *PDC*, для снижения теплового воздействия на мерзлые породы таких коронок необходимо проведение дополнительного исследования влияния их конструктивных особенностей на прирост температуры на забое при разрушении горной породы.

Помимо прочностных, конструктивных возможностей *PDC*, преимуществом таких резцов выступает возможность изменения ориентации их режущей грани в вертикальной плоскости (путем изменения переднего и заднего углов установки), а также и относительно радиуса коронки (путем изменения фронтального угла установки [1, 10, 26]). Фронтальный угол ( $\phi_p$ ) [1] (угол поворота резца [10]; боковой угол [26]) установки *PDC* – угол между плоскостью режущей грани *PDC* и радиусом коронки (рис. 2).



Рис. 2. Схема изменения фронтального угла резца РDС (вид с торца коронки): а) один резец; б) несколько резцов в матрице; 1 – режущая грань PDC; φ<sub>p</sub> – фронтальный угол установки резца; R – наружный радиус буровой коронки

**Fig. 2.** Scheme of changing the frontal angle of a PDC incisor (view from the end of the crown): a) one incisor; b) several incisors in the matrix; 1 - PDC cutting edge;  $\varphi_p$  – front angle of cutter installation; R – outer radius of the drill bit

Воспользовавшись вышеописанным способом аналитического исследования, получим математическую модель (10), показывающую зависимость прироста температуры от параметров механизма разрушения горной породы буровым инструментом типа *PDC*:

$$\Delta t_3 = \frac{0.52\omega r N_{\rm p}(\frac{\pi\sigma_{\rm CK}h\sqrt{dh}cos\varphi_{\rm p}(1+tg\varphi)}{sin\gamma_{\rm CK}} + Pf)}{G} \quad , \qquad (10)$$

где  $\phi_p$  – фронтальный угол установки резца.

Анализ полученной математической модели показывает, что ориентация резца типа PDC, а именно фронтальный угол установки резца, при прочих равных условиях (режимах бурения и параметров очистного агента – воздуха) оказывает влияние на температурный режим работы инструмента и, как следствие, на возможную величину роста температуры забоя. При этом, как известно, повышение величины фронтального угла приводит к повышению глубины разрушения горной породы.

Для детального исследования влияния ориентации резца на температурный режим работы инструмента при отборе проб керна в мерзлых грунтах за основу принята конструкция коронки PDC (рис. 1, б), хорошо зарекомендовавшей себя при производственном бурении как инструмент с высокими показателями износостойкости. Для дальнейших расчетов величина фронтального угла принималась в пределах от 0 до 15°, прочность пород принималась согласно рекомендациям [29] (на рис. 3 представлены некоторые из полученных результатов). Согласно результатам аналитических расчетов, увеличение значения фронтального угла установки резца PDC на 1 градус при неизменных режимах бурения (значения Р, G, ω оставались постоянными) приводит к снижению температуры забоя на 2-5 % (в зависимости от свойств горной породы и влажности среды), причем чем больше величина фронтального угла установки резца, тем больше степень влияния данного параметра на величину снижения температуры (рис. 3).



Рис. 3. График зависимости прироста температуры забоя (Δt<sub>3</sub>) от величины фронтального угла установки PDC (φ<sub>p</sub>) при бурении коронкой диаметром 112 мм с 8 резцами: 1 – мерзлый суглинок; 2 – песчаник; 3 – доломит

**Fig. 3.** Graph of the dependence of the increase in bottomhole temperature  $(\Delta t_3)$  on the value of the front angle of the PDC  $(\varphi_p)$  installation when drilling with a bit with a diameter of 112 mm with 8 cutters: 1 – frozen loam; 2 – sandstone; 3 – dolomite

Полученный результат объясняется тем, что при увеличении фронтального угла снижается сопротивление со стороны забоя за счет лучшей очистки режущей грани от шлама (шлам не скапливается перед резцом) и снижения лобового сопротивления перемещению резца в горной породе, что, как следствие, приводит к снижению забойной мощности.

#### Заключение

Представленный подход позволяет оценивать влияние ориентации, типа и геометрии резцов, армирующих коронку, на возможность изменения прироста температуры на забое. Исходя из итогов проведенного исследования и производственного бурения в мерзлых грунтах, а также основываясь на известных данных и научных выводах, можно заключить, что выбор оптимальной геометрии режущей части бурового инструмента способствует повышению эффективности отбора керна при проведении инженерно-геологических изысканий в условиях отрицательных температур.

Для получения достоверной геологической информации о мерзлых грунтах отбор керна должен осуществляться в условиях сохранения температурного режима призабойной зоны, близкого к естественным условиям его залегания. Конструкция породоразрушающего инструмента, предназначенного для отбора проб мерзлых грунтов, должна способствовать снижению затрат мощности на разрушение горной породы, что позволит снизить прирост температуры забоя, возникающий от реализации механической работы инструмента. Снижение затрат мощности на разрушение горных пород возможно, например, путем уменьшения сопротивления перемещению резцов, возникающего со стороны забоя. При этом проектирование режущей части коронки должно основываться на механизме разрушения горных пород с учетом возможной области применения инструмента и условий его эксплуатации.

Исходя из того, что для бурения в мерзлых породах породоразрушающий инструмент должен обладать высокой степенью износостойкости и при этом иметь вооружение, способствующее снижению сопротивления, возникающего со стороны забоя в процессе бурения, перспективным при разработке конструкций бурового инструмента для отбора проб мерзлых грунтов выступает инструмент, армированный резцами типа PDC. Резец PDC отличается своими прочностными показателями. Размеры, форма и возможность ориентации резцов PDC позволяют достигать достаточно высоких скоростей бурения при оптимальных показателях затрат мощности на разрушение горных пород и высоком ресурсе. Увеличение величины фронтального угла установки PDC способствует снижению сопротивления, возникающего со стороны забоя, и тем самым снижению затрат мощности, что, в свою очередь, отражается на температурном режиме работы инструмента. К тому же такой резец давно зарекомендовал себя как способный эффективно работать как при пластическом резании, так и при хрупком скалывании, что актуально, учитывая механизм разрушения мерзлых пород, легко изменяющих свои свойства в условиях перепада температур.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Нескоромных В.В., Попова М.С., Баочанг Л. Разрушение горных пород при бурении скважин алмазным буровым инструментом: монография. Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2020. 268 с.
- 2. Increasing annual and extreme precipitation in permafrost-dominated Siberia during 1959–2018 / P. Wang, Q. Huang, Q. Tang et al. // Journal of Hydrology. 2021. Vol. 603. P. 126865. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2021.126865.
- 3. New high-resolution estimates of the permafrost thermal state and hydrothermal conditions over the Northern Hemisphere / Y. Ran, G. Cheng, H. Jin et al. // Earth System Science Data. 2022. Vol. 14. № 2. P. 865–884. DOI: 10.5194/essd-14-865-2022.
- Brook B. Principles of diamond tool technology for sawing rock // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2002. – Vol. 39 (1). – P. 41–58.
- 5. Control of the interactions between stream and groundwater by permafrost and seasonal frost in an Alpine Catchment, Northeastern Tibet Plateau, China / R. Ma, Z. Sun, Q. Chang et al. // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. 2021. Vol. 126. № 5. P. e2020JD033689. DOI: 10.1029/2020JD033689.
- 6. Попова М.С. Гидродинамические процессы при разработке конструкций алмазного бурового инструмента // Известия томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2024. Т. 335. № 4. С. 159–171.
- Vtorushin E.V., Dorovsky V.N. Cutting forces estimation with non-Euclidean model of inelastic deformations applied to rock cutting. – San Francisco: ARMA, American Rock Mechanics Association, 2017. – Vol. 4. – 137 p.
- 8. Detournay E., Richard T., Shepherd M. Drilling response of drag bits: theory and experiment // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2008. Vol. 45 (8). P. 1347-1360.
- 9. Basarir H., Karpuz C. Preliminary estimation of rock mass strength using diamond bit drilling operational parameters // International Journal of Mining, Reclamation and Environment. 2016. Vol. 30 (2). P. 145–164.
- 10. Борисов К.И. Современные способы оценки эффективности разрушения горных пород резанием-скалыванием долотами типа PDC // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2022. Т. 333. № 6. С. 103–121. DOI: 10.18799/24131830/2022/6/3756.
- 11. Инновационные подходы к конструированию высокоэффективного породоразрушающего инструмента / А.Я. Третьяк, В.В. Попов, А.Н. Гроссу, К.А. Борисов // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2017. № 8. С. 225–230.

- 12. Su O., Akcin A. Numerical simulation of rock cutting using the discrete element method // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2011. Vol. 48 (3). P. 434–442.
- 13. Hasan A.R., Kabir C.S. Wellbore heat-transfer modeling and applications // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2012. Vol. 96–97. P. 109–119.
- 14. A novel method for measuring and analyzing the interaction between drill bit and rock / X. Wang, Z. Wang, D. Wang, L. Chai // Measurement. – 2018. – Vol. 121. – P. 344–354.
- 15. Che D., Zhu W.-L., Ehmann K.F. Chipping and crushing mechanisms in orthogonal rock cutting // International Journal of Mechanical Sciences. 2016. № 119. P. 224–236.
- Третьяк А.Я., Борисов К.А. Классификация поломок пластин PDC, вызываемых забойными вибрациями при бурении скважин // Результаты исследований–2020. Материалы V Национальной конференции профессорскопреподавательского состава и научных работников ЮРГПУ (НПИ). – Новочеркасск, 2020. – С. 252–254.
- 17. Influence of freezing-thawing on shear strength of frozen soil in Northeast China / R. Chen, D.Z. Li, D.X. Hao, K.L. Wei // Applied Mechanics and Materials. 2016. Vol. 835. P. 525–530.
- Optimization model for polycrystalline diamond compact bits based on reverse design / Z. Ai, Y. Han, Y. Kuang, Y. Wang, M. Zhang // Advances in Mechanical Engineering. – 2018. – Vol. 10 (6). – P. 476–479.
- 19. Numerical investigations on the effect of ultra-high cutting speed on the cutting heat and rock-breaking performance of a single cutter / M. Gao, K. Zhang, Q. Zhou, H. Zhou, B. Liu, G. Zheng // Journal of Petroleum Science and Engineering. July 2020. Vol. 190. № 107120.
- 20. Integrated hydrogeological and hydrogeochemical dataset of an alpine catchment in the northern Qinghai-Tibet Plateau / Z. Pan, R. Ma, Z. Sun et al. // Earth System Science Data. 2022. Vol. 14. № 5. P. 2147–2165. DOI: 10.5194/essd-14-2147-2022.
- 21. Huang H., Lecampion B., Detournay E. Discrete element modeling of tool-rock interaction I: Rock cutting // International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics. 2013. Vol. 37 (13). P. 1913–1929.
- 22. Зезюлин В.А., Линьков С.А. О физико-механических характеристиках разрушения мерзлых грунтов // Омский научный вестник. 2006. № 8 (44). С. 75–77.
- 23. Литенко П.А., Маслов Н.А. Сравнительный анализ способов разработки горных пород и мерзлых грунтов // Энергоресурсосберегающие технологии и оборудование в дорожной и строительной отраслях: Материалы международной научно-практической конференции. – Белгород, 22–25 сентября 2022. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2022. – С. 103–109.
- 24. Максимова М.А. Специфика подготовки многолетнемерзлых горных пород // Инновации. Наука. Образование. 2022. № 50. С. 1889–1900.
- 25. Рочев В.Ф., Мельников А.Е. Исследование механизма разрушения мерзлых глинистых пород в водной среде // Успехи современного естествознания. 2018. № 12-2. С. 380–384.
- 26. Сверхтвердые материалы в геологоразведочном бурении: монография / П.В. Зыбинский, Р.К. Богданов, А.П. Закора, А.М. Исонкин. Донецк: Норд-Пресс, 2007. 244 с.
- 27. Нескоромных В.В. Анализ процесса разрушения анизотропной горной породы шарошечными долотами // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2015. Т. 326. № 2. С. 80–89.
- 28. Кудряшов Б.Б., Яковлев А.М. Бурение скважин в мерзлых породах. М.: Недра, 1983. 286 с.
- 29. Нерадовский Л.Г. Сравнительный анализ прочности осадочных пород в криолитозоне Южной Якутии и на территории г. Нерюнгри // Недропользование XXI век. 2022. № 6 (98). С. 49–57.

#### Информация об авторах

**Марина Сергеевна Попова**, кандидат технических наук, доцент Высшей нефтяной школы Югорского государственного университета, Россия, 628012, г. Ханты-Мансийск, ул. Чехова, 16. alleniram83@mail.ru; http://orcid.org/0000-0002-1462-8339

**Борис Васильевич Григорьев**, старший преподаватель кафедры недропользования, Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, Россия, 677000, г. Якутск, ул. Белинского, 58; titrykt@gmail.com

Поступила в редакцию: 02.07.2024 Поступила после рецензирования: 24.07.2024 Принята к публикации: 02.04.2025

#### REFERENCES

- 1. Neskoromnih V.V., Popova M.S., Liu Baochang. *Destruction of rocks when drilling wells with diamond drilling tools: monograph*. Krasnoyarsk, Siberian Federal University Publ., 2020. 268 p. (In Russ.)
- 2. Wang P., Huang Q., Tang Q. Increasing annual and extreme precipitation in permafrost-dominated Siberia during 1959–2018. *Journal of Hydrology*, 2021, vol. 603, pp. 126–865.
- 3. Ran Y., Cheng G., Jin H. New high-resolution estimates of the permafrost thermal state and hydrothermal conditions over the Northern Hemisphere. *Earth System Science Data*, 2022, vol. 14, no. 2, pp. 865–884.
- 4. Brook B. Principles of diamond tool technology for sawing rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2002, vol. 39 (1), pp. 41–58.
- Ma R., Sun Z., Chang Q. Control of the interactions between stream and groundwater by permafrost and seasonal frost in an Alpine Catchment, Northeastern Tibet Plateau, China. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2021, vol. 126, no. 5, pp. e2020JD033689. DOI: 10.1029/2020JD033689.

- 6. Popova M.S. Hydrodynamic processes in designing diamond drilling tools. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering, 2024, vol. 335, no. 4, pp. 159–171. (In Russ.)
- 7. Vtorushin E.V., Dorovsky V.N. *Cutting forces estimation with non-Euclidean model of inelastic deformations applied to rock cutting*. San Francisco, ARMA, American Rock Mechanics Association, 2017. Vol. 4, 137 p.
- 8. Detournay E., Richard T., Shepherd M. Drilling response of drag bits: theory and experiment. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2008, vol. 45 (8), pp. 1347–1360.
- 9. Basarir H., Karpuz C. Preliminary estimation of rock mass strength using diamond bit drilling operational parameters. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 2016, vol. 30 (2), pp. 145–164.
- 10. Borisov K.I. Modern methods of evaluating the effectiveness of rock destruction by cutting with *PDC* bits. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333. no. 6, pp. 103–121. (In Russ.)
- 11. Tretyak A.Ya., Popov V.V., Grossu A.N., Borisov K.A. Innovative approaches to the design of highly efficient rock cutting tools. *Gorny informatsionno-analiticheskii byulleten*, 2017, no. 8, pp. 225–230. (In Russ.)
- 12. Su O., Akcin A. Numerucal simulation of rock cutting using the discrete element method. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2011, vol. 48 (3), pp. 434–442.
- 13. Hasan A.R., Kabir C.S. Wellbore heat-transfer modeling and applications. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2012, vol. 96–97, pp. 109–119.
- 14. Wang X., Wang Z., Wang D., Chai L. A novel method for measuring and analyzing the interaction between drill bit and rock. *Measurement*, 2018, vol. 121, pp. 344–354.
- 15. Che D., Zhu W.-L., Ehmann K.F. Chipping and crushing mechanisms in orthogonal rock cutting. International Journal of Mechanical Sciences, 2016, no. 119, pp. 224–236.
- 16. Tretyak A.Ya., Borisov K.A. Classification of PDC plate fractures caused by downhole vibrations during well drilling. *Research results-2020. Materials of the V National Conference of the teaching staff and researchers of the YRSPU (NPI)*. Novocherkassk, 2020. pp. 252–254 (In Russ.)
- 17. Chen R., Li D.Z., Hao D.X., Wei K.L. Influence of freezing-thawing on shear strength of frozen soil in Northeast China. *Applied Mechanics and Materials*, 2016, vol. 835, pp. 525–530.
- 18. Ai Z., Han Y., Kuang Y., Wang Y., Zhang M. Optimization model for polycrystalline diamond compact bits based on reverse design. *Advances in Mechanical Engineering*, 2018, vol. 10 (6), pp. 476–479.
- Gao M., Zhang K., Zhou Q., Zhou H., Liu B., Zheng G. Numerical investigations on the effect of ultra-high cutting speed on the cutting heat and rock-breaking performance of a single cutter. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2020, vol. 190, no. 107120.
- 20. Pan Z., Ma R., Sun Z. Integrated hydrogeological and hydrogeochemical dataset of an alpine catchment in the northern Qinghai-Tibet Plateau. *Earth System Science Data*, 2022, vol. 14, no. 5, pp. 2147–2165. DOI: 10.5194/essd-14-2147-2022.
- 21. Huang H., Lecampion B., Detournay E.Discrete element modeling of tool-rock interaction I: Rock cutting. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2013, no. 37 (13), pp. 1913–1929.
- 22. Zezyulin V.A., Linkov S.A. On the physical and mechanical characteristics of the destruction of frozen soils. *Omsk Scientific Bulletin*, 2006, no. 8 (44), pp. 75–77. (In Russ.)
- Litenko P.A., Maslov N.A. Comparative analysis of methods for developing rocks and frozen soils. *Energy-resource-saving technologies and equipment in the road and construction industries. Proc. of the international scientific and practical conference.* Belgorod, September 22–25, 2022. Belgorod, V.G. Shukhov Belgorod State Technological University Publ., 2022. pp. 103–109. (In Russ.)
- 24. Maksimova M.A. Specifics of preparing permafrost rocks. *Innovation. Science. Education*, 2022, no. 50, pp. 1889–1900. (In Russ.)
- 25. Rochev V.F., Melnikov A. E. Study of the mechanism of destruction of frozen clay rocks in the aquatic environment. *Advances* of modern natural science, 2018, no. 12-2, pp. 380–384. (In Russ.)
- 26. Zybinsky P.V., Bogdanov R.K., Zakora A.P., Isonkin A.M. Superhard materials in geological exploration drilling: monograph. Donetsk, Nord-Press, 2007. 244 p. (In Russ.)
- 27. Neskoromnih V.V. Analysis of the process of destruction of anisotropic rock with roller bits. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2015, vol. 326, no. 2, pp. 80–89. (In Russ.)
- 28. Kudryashov B.B., Yakovlev A.M. Drilling wells in frozen rocks. Moscow, Nedra Publ., 1983. 286 p. (In Russ.)
- 29. Neradovskii L.G. Comparative analysis of the strength of sedimentary rocks in the permafrost zone of south Yakutia and in the territory of the city of Neryungri. *Subsoil use XXI century*, 2022, no. 6 (98), pp. 49–57. (In Russ.)

#### Information about the authors

**Marina S. Popova**, Cand. Sc., Associate Professor, Yugra State University, 16, Chekhov street, Khanty-Mansiysk, 628012, Russian Federation. alleniram83@mail.ru; http://orcid.org/0000-0002-1462-8339

**Boris V. Grigoriev**, Senior Lecturer, M.K. Ammosov North-Eastern Federal University, 58 Belinsky street, Yakutsk, 677000, Russian Federation; titrykt@gmail.com

Received: 02.07.2024 Revised: 24.07.2024 Accepted: 02.04.2025
УДК 504:622.691.24 DOI: 10.18799/24131830/2025/5/4726 Шифр специальности ВАК: 1.6.21 Обзорная статья

# Влияния закачки промышленных жидких отходов на гидродинамические условия принимающего горизонта

# Р.А. Гасумов<sup>1⊠</sup>, Э.Р. Гасумов<sup>2, 3</sup>

<sup>1</sup> Северо-Кавказский Федеральный Университет, Россия, г. Ставрополь <sup>2</sup> Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности, Азербайджан, г. Баку <sup>3</sup> Азербайджанский технический университет, Азербайджан, г. Баку

<sup>™</sup>R.Gasumov@yandex.ru

Аннотация. Актуальность. Обоснование возможности промышленной эксплуатации полигона подземного захоронения сточных вод, образующихся в процессе производственной деятельности, с целью утилизации промышленных стоков должно способствовать выбору способа утилизации промышленных стоков, обеспечивать экологическую безопасность и предотвратить загрязнение земной поверхности, открытых водоёмов и пресных подземных вод. Для чего необходима оценка структурно-тектонических и гидрогеологических условий полигона с точки зрения использования его для целей подземного захоронения сточных вод, определение гидродинамических параметров по данным пробной закачки сточных вод и выполнение прогнозных гидрогеологических расчетов. Это позволит разработать рекомендации по дальнейшей эксплуатации полигона подземного захоронения сточных вод с использованием объективной информация о процессах, происходящих в пласте-коллекторе при нагнетании отходов, о состоянии геологической среды и инженерных сооружений при закачке промысловых сточных вод. Вопросы экологической безопасности, эффективности эксплуатации объектов и прогнозирования возможных последствий таких процессов требуют изучения влияния закачки промышленных жидких отходов на гидродинамические условия принимающего горизонта, которая связана с необходимостью обоснования выбора пластов для захоронения отходов, влияния закачки на приёмистость нагнетательных скважин, на пластовое давление и на фильтрационноёмкостные свойства пород. Цель. Комплексная оценка происходящих в пласте-коллекторе гидродинамических процессов при закачке (нагнетании) промысловых сточных вод, их воздействия на геологическую среду (что приводит к изменению её структуры), инженерных сооружений и экологической безопасности эксплуатации полигона подземного захоронения промышленных жидких отходов. Методы. Сбор и обобщение промысловых материалов по изучаемому району. Для изучения закачки сточных вод использовались промысловые материалы поглощающих скважин, при анализе – фактические данные опытно-промышленной эксплуатации полигона подземного захоронения сточных вод и результатов гидрогеологических исследований. Оценка гидродинамических параметров проводилась с использованием результатов пробной закачки. Результаты и выводы. Исследованы сводоносный комплекс для размещения (захоронения) промышленных жидких отходов в геологическом разрезе участка недра. Проведена комплексная оценка влияния закачки промышленных отходов – отложений альбской толщи нижнемеловых отложений - на гидродинамические условия принимающего горизонта. Определены приемистость поглощающих скважин, их средние значения для различных видов закачки, допустимые концентрации загрязняющих веществ в сточных водах, содержание механических примесей и нефти, закачиваемой в принимающий горизонт. Определены радиусы распространения промстоков на конец расчетного периода эксплуатации полигона с учетом уже закачанного объема и сноса «пятен загрязнения» под естественным напором пластовых вод, прогнозный радиус «пятна загрязнения» при эксплуатации полигона. Предложена геологическая модель отклонений от проектных показателей при эксплуатации объекта, рассмотрены варианты, при которых промстоки могут выйти за пределы горного отвода.

**Ключевые слова:** промышленные стоки, сточные воды, подземное захоронение, альбский ярус нижнего мела, расход, давление, приемистость скважины

**Для цитирования:** Гасумов Р.А., Гасумов Э.Р. Влияния закачки промышленных жидких отходов на гидродинамические условия принимающего горизонта // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 5. – С. 37–48. DOI: 10.18799/24131830/2025/5/4726 UDC 504:622.691.24 DOI: 10.18799/24131830/2025/5/4726 Review article

# Impact of injection of industrial liquid waste on hydrodynamic conditions of receiving horizon

R.A. Gasumov<sup>1⊠</sup>, E.R. Gasumov<sup>2, 3</sup>

<sup>1</sup> North Caucasus Federal University, Stavropol, Russian Federation
 <sup>2</sup> Azerbaijan State University of Oil and Industry, Baku, Azerbaijan
 <sup>3</sup> Azerbaijan Technical University, Baku, Azerbaijan

<sup>™</sup>R.Gasumov@yandex.ru

Abstract. Relevance. Justification of the possibility of industrial operation of the landfill of underground disposal of wastewater generated in industrial activity for disposal of industrial effluents should facilitate the choice of the method of disposal of industrial effluents, ensure environmental safety and prevent pollution of the earth's surface, open water bodies and fresh groundwater. For this purpose, it is necessary to assess the structural-tectonic and hydrogeological conditions of the landfill from the point of view of its use for underground disposal of wastewater, determine the hydrodynamic parameters according to the test injection of wastewater and perform predictive hydrogeological calculations. This will allow developing recommendations for further operation of the landfill of underground disposal of wastewater, using objective information on the processes occurring in the reservoir during waste injection, on the state of the geological environment and engineering structures during the injection of industrial wastewater. The issues of environmental safety, the efficiency of operation of facilities and forecasting the possible consequences of such processes require the studying of the impact of industrial liquid waste injection on the hydrodynamic conditions of the receiving horizon. This is associated with the need to justify the choice of layers for waste disposal, the injection impact on the intake capacity of injection wells, on reservoir pressure and on the filtration-capacitive properties of rocks. Aim. Comprehensive assessment of the hydrodynamic processes occurring in the reservoir during the injection of industrial wastewater, their impact on the geological environment (which leads to a change in its structure), engineering structures and the environmental safety of the operation of an underground disposal site for industrial liquid waste. *Methods.* Collection and synthesis of fishing materials for the study area. To study wastewater injection, field materials from absorption wells were used, and the analysis included actual data from the pilot operation of an underground wastewater disposal site and the results of hydrogeological studies. Hydrodynamic parameters were assessed using test injection results. Results and conclusions. The authors have studied a water-bearing complex for the placement (disposal) of industrial liquid waste in the geological section of the subsurface area. They carried out a comprehensive assessment of the industrial waste injection effect on the hydrodynamic conditions of the receiving horizon - deposits of the Albian sequence of Lower Cretaceous deposits. The injectivity of absorption wells, their average values for various types of injection, permissible concentrations of pollutants in wastewater, content of mechanical impurities and oil injected into the productive formation were determined. The radii of distribution of industrial wastewater at the end of the estimated period of operation of the landfill were determined, taking into account the already pumped volume and the removal of "pollution spots" under the natural pressure of formation waters, and the predicted radius of the "pollution spot" during operation of the landfill. The authors proposed a geological model of deviations from design indicators during the operation of the facility, and considered the options in which industrial wastewater can go beyond the boundaries of the mining allotment.

**Keywords:** industrial wastewater, wastewater, underground burial, Albian stage of the Lower Cretaceous, flow rate, pressure, well infectivity

**For citation:** Gasumov R.A., Gasumov E.R. Impact of injection of industrial liquid waste on hydrodynamic conditions of receiving horizon. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 5, pp. 37–48. DOI: 10.18799/24131830/2025/5/4726

#### Введение

Подземное захоронение промышленных жидких отходов (ПЗПЖО) осуществляется только на частично действующих и недействующих подземных резервуарах (структурах), отвечающих определенным техническим и геологическим критериям. Захоронение промышленных отходов в глубокие горизонты может осуществляться с учетом их совместимости с пластовыми водами и подстилающими породами, если обоснована техническая невозможность или обезвреживание жидких отходов в земле экологически и экономически нецелесообразно [1, 2].

По мере выработки основных месторождений углеводородов Юга России район из газоснабжаю-

щего постепенно становится газопотребляющим и представляет свои территории для хранения и газотранспортировки природного газа в Кавказский регион. В качестве ёмкостей для ПЗПЖО можно использовать пласт-коллектор, соответствующий определенным техническим и геологическим требованиям, предъявляемым при создании полигона. Исследуемый объект для подземного захоронения промышленных стоков расположен на территории истощенного газоконденсатного месторождения (ГКМ), в отложениях II+III пластов альбского яруса нижнего мела, залегающих на глубинах 1300-1400 м. В структурном положении II и Ш пластов альбского яруса наблюдается увеличение толщины пластов-коллекторов от свода складки к ее южному крылу.

#### Объекты и методика исследования

Объектом исследования являются песчаные пласты альбского яруса в пределах горного отвода полигона ПЗПЖО и сточные воды, образующиеся при эксплуатации объектов добычи и хранения углеводородов. Выполнение прогнозных гидрогеологических расчётов с использованием промысловых данных позволяет получит объективную информации о процессах, происходящих в пластеколлекторе при нагнетании жидких отходов в подземном природном резервуаре для длительного времени размещения. Использование фактических данных опытно-промышленной эксплуатации полигона подземного захоронения сточных вод в истощённом газовом месторождении и результатов гидрогеологических исследований позволяют оценить состояние горизонта закачки по толщине, простиранию и литологическому составу, а также состояние коллекторских свойств пласта, используемых для размещения сточных вод. В качестве поглощающих рассматриваются нагнетательные скважины № 1Ab, 2Ab фактическими объёмами закачки до 600 м<sup>3</sup> в месяц, средняя приёмистости скважин 101,4-105,8 м<sup>3</sup>/сут МПа. Водоносный комплекс нижнего мела входит в водонапорную систему, состоящую из комплекса водоносных горизонтов, залегающих на дислоцированном основании складчатого фундамента.

Проведённый анализ геофизического материала по скважинам, пробуренным в пределах площади, позволил установить наличие выдержанных по площади глинистых разделов между Ia+I и II+III пластами альбского яруса нижнего мела, куда ведётся закачка сточных вод. Этот глинистый раздел, хорошо прослеживающийся по всей площади, является надёжной покрышкой (обеспечивающая герметичность), толщина которой изменяется от 2,8 до 9,4 м (покрышка обладает высокими флюидоупорными свойствами). В рамках проводимых исследований изучены приёмистости нагнетательных скважин, результаты которых позволили оценить потенциал каждого объекта для длительного периода эксплуатации полигона подземного захоронения сточных вод (ПЗСВ).

Поскольку ПЗСВ расположен на базе истощенного газоконденсатного месторождения, о продуктивных пластах геологического разреза и непосредственно об объекте подземного захоронения сточных вод имеется довольно подробная геологическая информация, которая была использована при проведении исследований в рамках данной работы.

## Результаты исследования и их обсуждение

Песчаные пласты альбского яруса расположены в пределах горного отвода ПЗСВ, образующихся при эксплуатации подземного геологического резервуара, предназначенного для хранения природного газа. Количество сточных вод в подземном хранилище характеризуется непостоянством во времени, зависит от сезона и определяется цикличностью периодов закачки–отбора газа. Основной объем сточных вод приходится на производственные сточные воды, образующиеся в период отбора газа [1, 3, 4].

Для закачки промстоков используются поглощающие скважины с средней приемистостью 101,4–105,8 м<sup>3</sup>/сут МПа. Закачиваемые промстоки совместимы с породой и пластовой водой свиты горячего ключа по основным осадкообразователям. Головые объемы закачки сточных вод составляют в основном не более 3000 м<sup>3</sup>, с максимальным расходом 140 м<sup>3</sup> в сутки. Анализ фактических данных опытно-промышленной эксплуатации полигона ПЗСВ и результатов гидрогеологических исследований показывает, что горизонт закачки выдержан по толщине, простиранию и литологическому составу и характеризуется достаточными коллекторскими свойствами для размещения промышленных стоков. Для оценки гидродинамических параметров использованы результаты пробной закачки (табл. 1).

При неустановившемся режиме давление на забое нагнетательной скважины определяется по уравнению [5]

$$\Delta p(t) = \frac{Q\mu}{4\pi kh} \ln \frac{2,25x}{r_{\rm mp}^2} + \frac{Q\mu}{4\pi kh} \ln t, \qquad (1)$$

где  $\Delta p(t)$  – репрессия на забое скважины по времени, МПа; Q – расход жидкости при закачке в скважину, м<sup>3</sup>/с;  $\mu$  – вязкость пластовой воды, мПа·с; k – коэффициент проницаемости, м<sup>2</sup>; h – толщина пласта, м;  $\chi$  – коэффициент пьезопроводности пласта, м<sup>2</sup>/с;  $r_{\rm np}$  – приведенный радиус скважины, м; t – время с начала остановки скважины.

Режим (при штуцере) Mode (with fitting) D=115 мм	Время, мин Time, min	Давление закачки, МПа Injection pressure, MPa	Время, мин Тіте, тіп	0бъём жидкости, м <sup>3</sup> Liquid volume, m <sup>3</sup>	Расход жидкости, <sup>m3</sup> /c Fluid consumption, m <sup>3</sup> /s			
Скважи	Скважина № 1Ab, режим/Well no. 1Ab, mode							
Ι	4	1,0	4	1,0	4,1			
II	6	1,4	6	3,0	8,3			
III	20	1,6	20	7,0	5,8			
Итого/Total			30	11,0	6,06			
Скважи	ина № 2Аb, режим	/Well nc	o. 2Ab,	mode				
Ι	11:17-11:22	5,0	5	1,5	5,0			
II	11:35-11:46	7,0	11	1,2	1,82			
III	11:46-11:56	7,5	11	1,8	2,73			
IV	11:56-12:06	7,6	11	0,2	0,3			
Итого/Total			38	4,7	9,85			

Таблица 1.	Определение приемистости скважины
Table 1.	Determination of well injectivity

Уравнение (1) можно переписать в виде

$$\Delta p(t) = A + i \ln t,$$

где

$$A = \frac{Q\mu}{4\pi kh} \ln \frac{2,25x}{r_{\rm up}^2}, \ i = \frac{Q\mu}{4\pi kh}.$$

Или после преобразования значение *i* определяется как tga:

$$i = \frac{\Delta p_2 - \Delta p_1}{\ln t_2 - \ln t_1}.$$

Коэффициенты проницаемости (k) и пьезопроводности ( $\chi$ ):

$$k = \frac{0.183Q\mu}{ih}, \ x = \frac{k}{\mu(m\beta_{*} + \beta_{c})},$$

где  $\mu$  – вязкость воды, мПа·с;  $\beta_{*}+\beta_{c}$  – соответственно коэффициенты сжимаемости воды и породы, ТПа<sup>-1</sup>; m – коэффициент пористости, д. ед. Коэффициент фильтрации определяется из выражения

$$K_f = 0,0864k\frac{\gamma}{\mu},$$

где  $K_f$  – коэффициент фильтрации, м/сут;  $\gamma$  – удельный вес воды, к $H/m^3$ .

Приведенный радиус скважины принят по данным ранее выполненных работ, согласно которым при вскрытии пласта перфоратором ПКС-80 с плотностью 12 отв/п.м для скважины диаметром 168 мм он составляет 0,04 м [6].

Забойное давление рассчитывалось с учетом положения статического уровня воды в скважине и плотности воды, и его повышение на трех ступенях закачки составило соответственно: скважина  $\mathbb{N}$  1Ab:  $\Delta p_1=1,17$  МПа,  $\Delta p_2=1,40$  МПа и  $\Delta p_3=1,60$  МПа; скважина  $\mathbb{N}$  2Ab:  $\Delta p_1=0,5$  МПа,  $\Delta p_2=0,7$  МПа,  $\Delta p_3=0,75$  МПа и  $\Delta p_4=0,76$  МПа. Значение коэффициента пористости принимается равным *m*=0,25.

Коэффициент вязкости воды определен по методике [6], согласно которой он равен

$$\mu = \mu_t + a_\mu M,$$

где  $\mu_t$  – коэффициент вязкости дистиллированной воды при заданной температуре;  $a_{\mu}$  – коэффициент, учитывающий влияние минерализации (*M*) на вязкость воды.

При минерализации воды 10 г/дм<sup>3</sup> и температуре закачиваемой воды T=20 °C вязкость воды составляет  $\mu=1,019\cdot10^{-9}$  МПа·с, коэффициент пористости пород m=0,25, получены результаты численных расчетов, средние для двух режимов по скважинам отражены в табл. 2.

Полученные значения гидродинамических параметров по результатам пробных одиночных закачек и по результатам гидропрослушивания практически идентичны, принимаются в качестве средних для объекта закачки и могут быть использованы для прогнозных расчетов повышения давления в пласте.

Таблица 2.Усреднённые показатели для двух режимов по скважинамTable 2.Average indicators for two modes for wells

Currente No	Усреднённые показатели для двух режимов Average indicators for two modes								
Well no.	i	<i>k,</i> мкм² µm²	<i>К<sub>f</sub>,</i> м/сут m/day	χ, м²/с m²/s	<i>т,</i> д. ед. unit fraction	<i>μ,</i> МПа MPa	<i>Т,</i> °С	<i>М,</i> г/дм <sup>3</sup> g/dm <sup>3</sup>	
1Ab	0,1715	0,755	0,63	3,04·10 <sup>5</sup>	0.25	1 010 10-9	20	10	
2Ab	0,213	0,246	0,21	1,0.105	0,25	1,019.10	20	10	

Примечание: і – численные расчёты і=Qµ/4πkh; k – коэффициент проницаемости; Q – расход скважины; h – толщина пласта; χ – коэффициент пьезопроводности пласт; μ – коэффициент динамической вязкости пластовой воды; M – минерализация воды; T – температура закачиваемой воды; К<sub>f</sub> – коэффициент фильтрации.

Note:  $i - numerical calculations i=Q\mu/4\pi kh$ ; k - permeability coefficient; Q - well flow rate; h - formation thickness;  $\chi - coefficient of formation piezoelectric conductivity; <math>\mu - coefficient of dynamic viscosity of formation water$ ; M - water mineralization; T - temperature of injected water;  $K_f - filtration coefficient$ .

В связи с этим для прогнозных расчетов репрессии в нагнетательных скважинах принимаются параметры, полученные по результатам периодических исследований на приемистость [1, 7, 8]. На полигоне ПЗСВ выполнен комплекс работ и исследований, позволяющий сделать вывод о том, что имеющейся геолого-геофизической информации достаточно для отнесения изучаемого участка недр к категории разведанных.

Для уточнения гидродинамических параметров поглощающего пласта предлагается в процессе эксплуатации в период максимального поступления сточных вод проведение длительной закачки (2-3 суток) на нескольких режимах. Закачку в нагнетательную скважину следует проводить с регистрацией давления на забое (середина интервала перфорации), с последующим прослеживанием восстановления уровня для определения гидравлической проводимости, коэффициента проницаемости и пьезопроводности пласта. Коэффициент пьезопроводности позволяет дать количественную оценку перераспределения давлений в пласте. Рекомендуется проводить исследование на трех ступенях с увеличением расхода закачки промстоков. Нагнетание жидкости с постоянным расходом следует производить до установления квазистационарного режима фильтрации, характеризующегося стабилизацией забойного давления, после чего осуществить переход на следующую ступень увеличения расхода. По окончании нагнетания следует записать кривую восстановления давления и обрабатывать результаты исследования по стандартной методике. В процессе исследования рекомендуется одновременно проводить гидравлические испытания (изучение характераспространения ристик упругого импульса/возмущения в пласте между исследуемыми скважинами), при которых регистрируется давление в наблюдательной скважине [9–11].

Стабильность эксплуатации нагнетательной скважины зависит от совместимости закачиваемых стоков с подземными водами пласта-коллектора и породой пласта, поэтому при гидрогеологическом обосновании подземного захоронения сточных вод была проведена оценка совместимости расчетным методом. Совместимость считается удовлетворительной, если при взаимодействии сточных вод с подземными водами и породами не будут возникать процессы, способствующие снижению приемистости нагнетательных скважин, а также такие явления, как выделение тепла, ядовитых газов, взрывоопасные условия и др. [1, 10].

Как известно из практики, при откачке сточных вод зона фильтрации породы заполняется сточными водами и вытесняет пластовые воды, создавая гидрохимические системы «поток – пластовые воды», «поток – пластовые воды – горные породы», «поток – пластовые воды», в которых происходят сложные физико-химические взаимодействия различного характера и направления. Физикохимические процессы, протекающие в пласте под воздействием закачиваемой жидкости и существенно влияющие на перенос веществ фильтрационным потоком, могут способствовать повышению проницаемости пород (растворение, выщелачивание), снижению (сорбция, седиментация, набухание глинистых минералов, рост бактерий и др.) или практически не оказывают на него никакого влияния (ионный обмен) [1, 9, 12, 13].

Изучение совместимости сточных и подземных вод - это прежде всего определение химического состава и устойчивости смеси, а также возможности изменения структуры и состава осадков. В пластовых условиях породы пласта находятся в равновесии с пластовой водой. Закачка сточных вод в полигоне ПЗПЖО во II и III пласты альбского яруса нижнего мела не вызовет существенных изменений в системе «сток-вода», поскольку в составе производственных стоков 80 % пластовых и конденсационных вод, смесь которых по генетическому типу и составляющим компонентам совпадает с показателями вод пласта-коллектора. Хозяйственно-бытовые сточные воды по своему химическому составу отличаются от пластовых, но, учитывая, что в составе стоков их объем не превысит 10 м<sup>3</sup>/сут, совместимость закачиваемых стоков будет зависеть от состава попутно-пластовых вод.

Основными компонентами, которые могут образовывать осадки сульфатных и карбонатных солей, присутствующих в сточных водах, являются соли серной и угольной кислоты. Прежде всего, возможно образование плохо растворимых сульфатных соединений (гипс, сульфоалюминат кальция); карбоната (кальцит, доломит); сульфида железа или гидроксида железа.

Для оценки вероятности выпадения сульфатных солей при смешивании жидкостей при закачке сточных вод определена степень насыщения жидкостей, смешанных с сульфатом кальция при температуре 40-50 °C, свидетельствующая о дефиците насыщения смесей и, соответственно, о малой вероятности выпадения плохо растворимых соединений. Результаты оценки совместимости стоков с пластовыми водами пласта-коллектора свидетельствуют о том, что воды совместимы при смешивании в любых соотношениях, и образование неорганических солей угольной кислоты и сульфаты кальция маловероятно. Дополнительная подготовка сточных вод необходима для снижения содержания взвешенных веществ, соединений железа и конденсата до требуемых концентраций.

В период эксплуатации полигона ПЗПЖО оценка совместимости расчетным и лабораторным (экс-

периментальным) методами проводилась в рамках контроля гидрогеологических параметров. Для обоснования совместимости попутных вод с водой на забое нагнетательной скважины и пластовыми условиями был проведен комплекс химикоаналитических исследований компонентного состава попутных вод, предполагаемых к закачке, и воды, отобранной на забое нагнетательной скважины; экспериментальные исследования на совместимость попутных вод с водой на забое нагнетательной скважины по карбонатам; расчетная оценка совместимости попутных вод с водой, отобранной на забое поглощающей скважины по сульфатам; расчеты прогнозных коэффициентов набухания пород пласта-приемника под воздействием закачиваемых вод [6, 14, 15].

Анализ результатов показывает, что для всех вариантов смешения стоков образование осадков сульфата кальция не прогнозируется при прогреве смесей до фоновой температуры пласта. Расчетный дефицит насыщения сульфатами смесей достигает 2400-4500 мг/дм<sup>3</sup>, поэтому сульфаты скорее будут растворяться, чем выпадать в осадок. Кроме того, была изучена возможность отложения осадков в виде карбонатов и рассмотрена для ряда условий, в том числе при смешении стоков с пластовой водой Ш и II пласта нижнемеловых отложений, при смешении стоков с водой призабойной зоны нагнетательной скважины на летние и зимние температурные условия, в том числе при прогреве смесей до пластовых температурных условий. По результатам экспериментального тестирования смесей в заданных пропорциях в течение пяти суток осадков не обнаружено, что позволило сделать отрицательный прогноз химической кольматации коллектора осадками. Набухание глинистой составляющей пласта не прогнозируется, так как отношение суммы двухвалентных катионов к общей сумме катионов в стоке выше (11,34 %), чем в пластовой воде (8,00 %).

Анализ содержания механических кольматантов в контрольных пробах сточных вод подтверждает низкую текущую эффективность применяемой технологии водоподготовки. Одновременное присутствие железа и сероводорода приводит к образованию вторичных осадков, влияющих на снижение поглощающей способности скважины.

Требования к подготовке сточных вод, закачиваемых в поглощающий горизонт, обусловлены необходимостью обеспечения приемистости нагнетательных скважин в течение всего периода эксплуатации. Соблюдение требований позволяет снизить величину кольматации призабойной зоны и увеличить период безремонтной эксплуатации скважины. Подготовка сточных вод заключается в ограничении содержания определенных компонентов, входящих в состав сточных вод [16]. Допустимое содержание компонентов определяется главным образом коллекторскими свойствами поглощающего горизонта.

Промышленные сточные воды, предназначенные для закачки в поглощающий горизонт альбского яруса нижнемеловых отложений, по своему качеству должны отвечать определённым требованиям [9, 17] (рисунок).

Содержание загрязняющих компонентов в сточных водах в зависимости от проницаемости поглощающего пласта регламентируется согласно методике разработки нормативов допустимых сбросов загрязняющих веществ в водные объекты для водопользователей, предъявляются более жесткие требования к содержанию механических примесей и нефтепродуктов в сточных водах [1, 12, 18, 19] (табл. 3).

Согласно данным гранулометрического состава мехпримесей, содержащихся в сточных водах, 2 % – частицы размером больше 1 мм, 70,9 % – частицы 0,5–0,1 мм, а остальная часть – частицы размером меньше 0,1 мм. Технологическая схема должна обеспечивать подготовку прогнозного максимально-го суточного объема сточных вод 140 м<sup>3</sup>/сут.

Таблица 3. Допустимое содержание механических примесей и нефти в закачиваемой в продуктивный коллектор воде с целью поддержания пластового давления

Table 3.	Permissible content of mechanical impurities and
	oil in water injected into the productive reservoir
	in order to maintain reservoir pressure

Проницаемость	Коэффициент	Допустимое содержа- ние в воде, мг/дм <sup>3</sup> Permissible content		
пористой среды	трещиноватости			
КОЛЛЕКТОРА, MKM <sup>2</sup> Permeability of the	коллектора	in water, mg	/dm <sup>3</sup>	
reservoir porous medium, μm <sup>2</sup>	Coefficient of relative reservoir- scale fractures	Mexпримесей Mechanical impurities	Нефти Oil	
<0,1 вкл.	-	<3	<5	
>0,1	-	<5	<10	
<0,35 вкл.	2-6,5	<15	<15	
>0,35	<2	<30	<30	
<0,6 вкл.	3,5-35	<40	<40	
>0.6	<3.6	<50 <50		

Исходя из средних значений проницаемости поглощающего пласта (0,060–0,772 мкм<sup>2</sup>), содержание механических примесей (взвешенных веществ) не должно превышать 3–50 мг/дм<sup>3</sup> для взвешенных веществ и 5–50 мг/дм<sup>3</sup> для нефтепродуктов [20]. Допустимые концентрации загрязняющих веществ в сточных водах, поступающих в водохранилище, должны соответствовать определенным значениям [17, 18] (табл. 4).

При закачке воды в поровые коллекторы проницаемостью до 0,068 мкм<sup>2</sup> 90% частиц должно быть не крупнее 1 мкм When pumping water into pore reservoirs with permeability up to 0.068 µm<sup>2</sup> 90% of particles should be no larger than 1 µm Содержание взвешенных частиц не должно превышать 300 мг/дм3 The content of suspended particles should not exceed 300 mg/dm3 Содержание нефтепродуктов (в том числе газового конденсата) не должно Heoбходимые требования /Necessary requirements превышать 150 мг/дм3 The content of petroleum products (including gas condensate) should not exceed 150 mg/dm<sup>3</sup> Содержание окисного железа - не более 3 мг/дм3 Iron oxide content - no more than 3 mg/dm3 pH в пределах 6,5-8,5 pH within 6.5-8.5 При коррозионной активности воды свыше 0,2 мм/год необходимо предусматривать мероприятия по антикоррозионной защите трубопроводов и оборудования (применение ПАВ, добавка небольших количеств нефти) When the corrosive activity of water exceeds 0.2 mm/year, it is necessary to take measures for anti-corrosion protection of pipelines and equipment (use of surfactants, addition of small amounts of oil) В воде, нагнетаемой в поглощающий пласт, пластовые воды которого не содержат сероводород или содержат ионы железа, сероводород должен отсутствовать There should be no hydrogen sulfide in the water injected into the absorbing formation, the formation waters of which do not contain hydrogen sulfide or contain iron ions Набухаемость глин-коллекторов в закачиваемой воде не должна превышать ее значения в пластовой воде The swelling capacity of clay reservoirs in injected water should not exceed its value in formation water Сточные воды должны быть совместимы с пластовой водой и породой пластаколлектора Wastewater must be compatible with produced water and reservoir rock

**Рисунок.** Необходимые требование для закачки в поглощающий горизонт альбского яруса нижнемеловых отложений **Figure.** Necessary requirements for injection of Lower Cretaceous sediments into the absorbent horizon of the Albian stage

Расчёт распространения сточных вод в пластеколлекторе производится по формуле «поршневого вытеснения» в соответствии с [7]:

$$R_{pw} = K_{hh} \sqrt{\frac{Q_{ff}}{\pi h_{ff} m \mathrm{B}}},$$

где  $R_{pw}$  – радиус зоны распространения сточных вод, м;  $K_{hh}$  – коэффициент надежности, принимается 1,5; в – коэффициент вытеснения пластовой воды (принимается равным 0,7);  $h_{ff}$  – эффективная толщина поглощающего пласта, м;  $Q_{ff}$  – объем сточных вод, закачанных за прошедший период,  $m^3$ ; m - эффективная пористость поглощающего горизонта, д. ед.

Расчетный проектный радиус распространения сточных вод определяется исходя из прогнозного годового объема закачки. Проектный срок эксплуатации принимается как максимально возможный для установленных границ горного отвода, а расчет необходимо выполнить на 20, 40, 20, 250 лет (табл. 5).

Таблица 4. Допустимые	концентрации	загрязняющих
веществ в сто	очных водах	

 Table 4.
 Permissible concentrations of pollutants in wastewater

Компонент	Бл изм	Допустимое содержание в сточных водах, % Permissible content in wastewater, %			
Component	Ед. изм. Unit	Межот-	Для усло-		
-		раслевые нормы	ВИИ ПОЛИ-		
		Intersecto	For landfill		
		rial norms	conditions		
Нефтепродукты		5	<150		
Petroleum products	!	5	\$150		
Взвешенные вещества Suspended substances		3	<300		
Железо общее/Total iron	MГ/ДМ <sup>-</sup> mg/dm3	3	<3		
Pастворенный кислород Dissolved oxygen	Ilig/ulli-	0,5	<5		
Сероводород Hydrogen sulfide		-	<15		
Диэтиленгликол Diethylene glycol	г/дм <sup>3</sup> g/dm <sup>3</sup>	-	<4		

Таблица 5. Прогнозный радиус «пятна загрязнения» при эксплуатации полигона

Table 5.	Predicted	radius	of	the	"contamination	spot"
	during lan	dfill ope	erat	ion		

0	Прогнозный радиус «пятна загрязнения» через годы эксплуатации, м								
Ž.		Fo	recast r	adius of	the "pollution s	pot"			
ина		-	after	years o	f operation, m				
ажı /ell		Год/Year							
KB:	20	40	20	40	200	250			
С	для II	пласта	для III	пласта	для II и III пластов				
	for la	iyer II	for lay	yer III	for layers II and III				
1Ab	94	133	106	133	Достигнет ус	тановленных			
					границ горного отвода				
2.41	70	78 98	0.0	100	Will reach the established				
ZAD	78		96	122	boundaries of the mining				
					allot	ment			

Объем закачки по пластам пропорционален эффективным толщинам пластов/Injection volume by layer is proportional to the effective thickness of the layers.

Схематизацию граничных условий следует производить исходя из региональных границ распространения поглощающего пласта. Анализ геологогидрогеологических региональных данных и корреляция разрезов показывает, что отложения альбского яруса распространены по всей территории рассматриваемого полигона-захоронения сточных вод и за ее пределами.

Тектоническое строение района полигона захоронения сточных вод характеризуется отсутствием в его пределах тектонических нарушений, которые могут выполнять роль непроницаемых границ при закачке сточных вод. В связи с вышеизложенным для расчетов пласт-коллектор схематизируется как напорный неограниченный в плане пласт [21, 22]. Закачка сточных вод на полигоне ПЗСВ характеризуется цикличностью, т. е. чередованием периодов закачки и периодов простоя. Динамика давления в соответствии с указанными периодами будет иметь циклический характер, что подтверждается фактическими замерами давлений на полигоне.

Таблица 6. Результаты расчета давления в нагнетательных скважинах на различные сроки эксплуатации (плотность стоков – 1004 кг/см<sup>3</sup>, радиус скважины – 0,084 м)

Table 6.

Results of calculating pressure in injection wells at different service life (effluent density – 1004 kg/cm<sup>3</sup>, well radius – 0.084 m)

CKB, N⁰ Well, no.	Водопроводимость пласта, м²/сут Formation water conductivity, m²/day	Пьезопроводность пласта, м²/сут Formation piezoconductivity, m²/day	Начальное пластовое давление, МПа Initial reservoir pressure, MPa	Расход закачки, м³/сут Injection consumption, m³/day	Время закачки, сут Download time, days	Репрессия на пласт, MIIa Overburden on formation, MPa	Пластовое давление, МПа Reservoir pressure, MPa	Давление нагнетания, МПа Discharge pressure, MPa
				140	10	0,22	13,03	-0,40
1Ab	10,71	$3.10^{5}$	12,81	11	140	0,02	12,83	-0,65
				8	730-9125	0,015	12,83	-0,655
				140	10	0,43	13,33	-0,076
2Ab	5,06	$1.10^{5}$	12,9	11	140	0,04	12,94	-0,52
				8	730-9125	0,03	12,93	-0,53

Повышение давления будет происходить в период закачки сточных вод, длительность которого составляет около 150 суток, затем, в период простоя, конус репрессии расформировывается. Расчет увеличения пластового давления в нагнетательных скважинах и давления на устье скважин на различные сроки эксплуатации полигона приведен в табл. 6.

Расчет распространения конуса репрессии в поглощающем пласте произведен исходя из формулы

$$\Delta P = \frac{\gamma_{\rm B}Q}{400\pi k_{\rm h}h} \ln \frac{2,25\,\chi t}{r_c^2},$$

где  $\Delta P$  – повышение пластового давления, МПа; Q – расход закачки сточных вод, м<sup>3</sup>/сут;  $\gamma_{\rm B}$  – плотность закачиваемых сточных вод, г/см<sup>3</sup>;  $k_{\rm \phi}$  – водопроводимость пласта, м<sup>2</sup>/сут; h – мощность пласта, м; t – продолжительность закачки стоков, сут;  $\chi$  – пьезопроводность, м<sup>2</sup>/сут;  $r_{\rm c}$  – радиус скважины, м.

Как видно из приведенных данных, повышение давления от закачки сточных вод за 40-летний период эксплуатации полигона распространится на расстояние до 1,5 км, что не окажет существенного

влияния на гидродинамическую обстановку поглощающего горизонта.

Максимальное избыточное давление в устье нагнетательных скважин регламентировано и не должно превышать давления гидроразрыва поглощающего пласта. Ожидаемое устьевое давление, при котором может быть достигнуто непроизвольное давление гидравлического разрыва пласта [10, 23–27]:

- для скважины 19 № 1Аb:
  - при прогнозном расходе закачки 140 м<sup>3</sup>/сут. потери на трение – 0,054 МПа;
  - при максимальном фактическом расходе закачки 576 м<sup>3</sup>/сут. потери на трение – 0,900 МПа;
- для скважины № 2 Аb:
  - при прогнозном расходе закачки 140 м<sup>3</sup>/сут. потери на трение – 0,054 МПа;
  - при максимальном фактическом расходе закачки 720 м<sup>3</sup>/сут. потери на трение – 1,43 МПа.

Следует отметить, что при эксплуатации скважин и при определениях приемистости устьевые давления не достигали расчетных величин давления непроизвольного гидравлического разрыва пласта [28–30].

Изучения процесса эксплуатации полигона ПЗПЖО свидетельствует о фактическом обеспечении прогнозной величины закачки сточных вод в годовом объеме 3000 м<sup>3</sup> и максимальной суточной приемистости 140 м<sup>3</sup>/сут. Фактические суточные объемы закачки сточных вод не превышают прогнозных, а устьевые давления нагнетания 5 МПа. Согласно проведенным расчетам, текущие и проектные контуры распространения сточных вод в поглощающем пласте не достигают наблюдательных скважин и не выходят за пределы установленного в лицензии горного отвода. Расчетные значения давления на пласт позволяют закачивать сточные воды при устьевом давлении, не превышающем максимально допустимое.

Сточные воды совместимы с пластовой водой по основным седиментационным агентам, а изменение требований к подготовке сточных вод к за-

качке может привести к увеличению времени между мероприятиями по восстановлению приёмистости нагнетательных скважин [1, 31–33]. Результаты мониторинга на полигоне ПЗСВ позволяют сделать вывод о соблюдении основных требований при эксплуатации объекта по экологической безопасности подземного захоронения сточных вод.

#### Заключение

Результаты проведённого исследования в истощённом месторождении позволяют сделать вывод о возможности дополнительно использовать в длительные сроки слой альбского яруса для захоронения (размещения) сточных вод, так как отложения широко распространены в районе и имеют равномерную мощность, покрыты надёжным, относительно непроницаемым для жидкостей слоем скального тела, обладают необходимыми ёмкостными фильтрующими свойствами. Установлено, что в процессе эксплуатации полигона контур распространения сточных вод в поглощающем пласте не достигает наблюдательных скважин и не выходит за пределы установленного горного отвода. Расчётные значения репрессии на пласт позволяют осуществлять закачку сточных вод с устьевыми давлениями нагнетания, не превышающими максимально допустимое давление, не провоцируя гидравлического разрыва пласта. Сточные воды совместимы с пластовой водой по основным осадкообразующим веществам. Подземный проницаемый водоносный горизонт имеет достаточную ёмкость для захоронения необходимого количества жидких промышленных отходов и изолирован от других водоносных горизонтов, используемых для водоснабжения, добычи полезных ископаемых и бальнеологических целей. Подземная прокладка сточных вод от производства является рациональным методом утилизации промышленных сточных вод, отвечающим определённым инженерногеологическим критериям и позволяющим экономически и экологически безопасно удалять, и надёжно обезвреживать промышленные сточные воды из среды обитания.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Гасумов Р.А., Гасумов, Э.Р., Минченко Ю.С. Особенности строительства подземных хранилищ на истощённых нефтегазоконденсатных месторождениях // Записки горного университета. 2020. Т. 244. С. 418–427. DOI: 10.31897/pmi.2020.4.4
- 2. Вайншток П.Н., Назаров В.Д., Назаров М.В. Очистка производственных сточных вод элекгрохимическим методом // Экология и промышленность России. – 2013. – № 2. – С. 18–21.
- 3. Бешенцев В.А. К вопросу о возможности захоронения сточных вод в недра // Горные ведомости. 2014. № 12. С. 30–42.
- Использование подземных горных выработок для захоронения радиоактивных отходов 3-го и 4-го классов / Н.В. Горин, В.П. Кучинов, С.В. Усанов, А.П. Васильев // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2023. – Т. 334. – № 9 – С. 128–136. DOI: https://doi.org/10.18799/24131830/2023/9/4159.
- 5. Гидродинамические исследования скважин / Т.А. Деева, М.Р. Камартдинов, Т.Е. Кулагина, П.В. Мангазеев, М.В. Панков. Томск, Изд-во ТПУ, 2004. 340 с.

- 6. Бешенцев В.А., Гуляева Ю.В. Состояние и перспективы глубинного захоронения сточных вод на месторождениях Ямало-Ненецкого автономного округа // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2022. – № 1. – С 12–23. DOI: https://doi.org/10.31660/0445-0108-2022-1-12-23.
- 7. Conditions of bottom deposit contamination in north-eastern Caspian field / A.Sh. Kanbetov, D.K. Kulbatyrov, A.A. Abilgazieva, A.K. Shakhmanova // SOCAR Proceedings. 2023. № 4. P. 156–161. DOI: 10.5510/OGP20230400929
- 8. Лепокурова О.Е., Трифонов Н.С. Оценка применимости геохимических геотермометров для пластовых вод Томской области // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2022. Т. 333. № 12. С. 208–218. DOI: https://doi.org/10.18799/24131830/2022/12/3878.
- О необходимости комплексной геоэкологической оценки техногенно нарушенных горными работами земель / В.Л. Гаврилов, Н.А. Немова, А.В. Резник, Н.С. Косарев, А.А. Колесников // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2023. – Т. 334. – № 10. – С. 76–87. DOI: https://doi.org/10.18799/24131830/2023/10/4212.
- Enhancing classification and recovery of barite from waste drilling fluid by inlet particle arranging of hydrocyclone / W. Lv, J. Zhao, M. Hao, J. Liu, Y. Zhang, J. Zheng, B. Su, Y. Wang, Y. Huang // Journal of Water Process Engineering. – 2023. – Vol. 56. – P. 104341. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.104341.
- Drill cuttings and drilling fluids (muds) transport, fate and effects near a coral reef mesophotic zone / R. Jones, M. Wakeford, L.C. Randall, K. Miller, H. Tonin // Marine Pollution Bulletin. – 2021. – Vol. 172. – P. 112717. DOI: https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112717
- 12. Гасумов Э.Р., Гасумов Р.А., Павлюкова И.В. Влияние техногенных факторов на геотехнические системы и обеспечении экологической безопасности разработки месторождений УВ // Территория «Нефтегаз». 2016. № 7–8. С. 110–115.
- 13. Ивченко М.В., Мельников Е.А. Захоронение промышленных сточных вод на подземных хранилищах газа // Газовая промышленность. 2017. № 1 (750). С. 112–116.
- 14. Казбулатова Г.М., Мичурин С.В., Карамова А.М. Геоэкологическая оценка состояния поверхностных вод Авзянского золотоносного района Республики Башкортостан // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333. – № 8. – С.139–152. DOI: https://doi.org/10.18799/24131830/2022/8/3556.
- 15. Geodynamic prerequisites and reflection of signs of fluid migration in hydrogeochemical indicators of formation water in the Bukhara-Khiva region / R.A. Umurzakov, T.Kh. Shoymuratov, A.S. Ibragimov, H.F. Khudoiberdiyev // SOCAR Proceedings. 2022. № 1. P.14–23. DOI: 10.5510/OGP20220100624.
- 16. Microalgae based wastewater treatment coupled to the production of high value agricultural products: current needs and challenges / A. Morillas-Espana, T. Lafarga, A. Sanchez-Zurano, F.G. Acien-Fernandez, C. Gonzalez-Lopez // Chemosphere. 2022. Vol. 291. P. 3. 132968. DOI: https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132968.
- Physical and chemical characterization of drill cuttings: a review / C. Costa, C.F. Carvalho, A.S. Soares, A.C. Souza, E.F. Bastos, E.C. Guimarães, J.C. Santos, T. Carvalho, V.H. Calderari, L.S. Marinho, M.R. Marques // Marine Pollution Bulletin. – September 2023. – Vol. 194. – P. A. – 115342. DOI: https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.115342
- Методики разработки нормативов допустимых сбросов загрязняющих веществ в водные объекты для водопользователей. Утверждена Приказ Министерства природных ресурсов и экологии РФ от 29 декабря 2020 г. № 1118. – М., 2020. – 53 с.
- Рациональные области применения различных видов оборудования для защиты от механических примесей / А.В. Булат, С.А. Карелина, В.Н. Ивановский, М.Г. Блохина, И.С. Пятов, Л.В. Воробьева, Ю.В. Кирпичев, В.Г. Тимошенко // Территория «Нефтегаз». – 2020. – № 9–10. – С. 52–63.
- 20. Гарайшин А.С., Кантюков Р.Р. Выбор пласта-аккумулятора для захоронения промышленных стоков Арбузовского ПХГ // Георесурсы. 2017. № 19 (1). С. 82–86. DOI: http://doi.org/10.18599/grs.19.1.13.
- Disposal of high-level nuclear waste in deep horizontal drillholes energies / R.A. Muller, S. Finsterle, J. Grimsich, R. Baltzer, E.A. Muller, J.W. Rector, J. Payer, J. Apps // Energies. 2019. № 12. P. 20–52. DOI: 10.3390/en12112052.
- 22. Гарайшин А.С., Рубан Г.Н. Основные критерии выбора пласта-аккумулятора для захоронения промышленных стоков Карашурского подземного хранилища газа // Георесурсы. 2010. № 4 (36). С. 26–29.
- 23. A life cycle assessment of drilling waste management: a case study of oil and gas condensate field in the north of western Siberia, Russia / G. Ilinykh, J. Fellner, N. Sliusa, V. Korotaev //Sustainable Environment Research. – 2023. – Vol. 33 (9). – P. 1–17. DOI: https://doi.org/10.1186/s4234-023-00171-0.
- 24. Semyachkov A.I., Pochechun V.A., Semyachkov K.A. Hydrogeoecological conditions of technogenic groundwater in waste disposal // Notes of the Mining Institute. 2023. Vol. 260. P. 168–178. DOI: 10.31897/PMI.2023.24.
- 25. Абдрахманов Р.Ф. Проблемы удаления жидких промышленных стоков в глубокие водоносные горизонты // Геологический вестник. 2019. № 1. С. 159–165. DOI: http://doi.org/10.31084/2619-0087/2019-1-13.
- 26. Soil Contamination by heavy metals and radionuclides and related bioremediation techniques: a review / Y. Chernysh, V. Chubur, I. Ablieieva, P. Skvortsova, O. Yakhnenko, M. Skydanenko, L. Plyatsuk, H. Roubík // Soil Syst. – 2024. – Vol. 8 (2). – P. 36. DOI: 10.3390/soilsystems8020036.
- 27. Оценка качества подземных вод, используемых в хозяйственно-питьевых целях в Республике Дагестан / Т.О. Абдулмуталимова, О.М. Рамазанов, А.Б. Алхасов, И.М. Газалиев // Юг России: экология, развитие. 2023. № 18 (2). С. 92–101. DOI: https://doi.org/10.18470/1992-1098-2023-2-92-101.
- Гасумов Э.Р., Велиев В.М Методы обеспечения экологической безопасности при разработке малых газоконденсатных месторождений // Инновационные технологии в нефтегазовой отрасли. Проблемы устойчивого развития: Сборник трудов Международной научно-практической конференции. – Ставрополь, 1–2 декабря 2020. – Ставрополь: СКФУ, 2020. – С. 402–412.
- 29. The fate of waste drilling fluids from oil & gas industry activities in the exploration and production operations / J. Njuguna, S. Siddique, L.K. Bakah, S. Piromrat, K.A. Afoakwa, U. Ekeh-Adegbotolu, G. Oluyemi, K. Yates, A.K. Mishra, L. Moller // Waste Management. 2022. Vol. 139. P. 362–380. DOI: https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.12.025.

- Contribution of HADES URL to the development of the Cigéo project, the French industrial centre for geological disposal of high-level and long-lived intermediate-level radioactive waste in a deep clay formation / G. Armand, J. Talandier, A. Dizier, X.L. Li, S. Levasseur // Geological Society, Special Publications. – 2022. – Vol. 536. – P. 237–256. DOI: https://doi.org/10.1144/SP536-2022-98.
- Mehnert E., Gendron C.R., Brower R.D. Investigation of the hydraulic effects of deep-well injection of industrial wastes // Environmental Geology – Illinois State Geological Survey, 1990. – 135 p. DOI: http://hdl.handle.net/2142/25572.
- 32. Trifonov N.S., Novikov D.A., Yamskikh A.A. Hydrogeological prerequisites for industrial waste injection during the development of priority area of the Yurubcheno-Tokhomo field // Water Resources. 2015. Vol. 42. № 7. P. 909–921. DOI: 10.1134/S0097807815070131.
- 33. Влияние экономической эффективности проекта на выбор технологий подготовки пластовой воды, используемой для системы ППД в ООО «РН-Пурнефтегаз» / А.А. Тихонов, Г.В. Фёдоров, Р.М. Масалимов, Л.Е. Каштанова, Е.М. Валеев, М.В. Турлаков // Нефтегазовое дело. 2022. Т. 20. № 4. С. 94–100.

## Информация об авторах

Рамиз Алиджавад-оглы Гасумов, доктор технических наук, профессор, академик РАЕН, заведующий кафедрой проектирования объектов нефтегазовой сферы Северо-Кавказский федеральный университет, Россия, 355017, г. Ставрополь, ул. Пушкина, 1; R.Gasumov@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0002-4700-2391 Эльдар Рамизович Гасумов, кандидат экономических наук, доцент кафедры менеджмента, Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности, Азербайджан, AZ1010, г. Баку, пр. Азадлыг, 20; докторант, Азербайджанский технический университет, Азербайджан, AZ1148, г. Баку, пр. Г. Джавида, 25. e.gasumov@gmail.com, https://orcid.org/0000-0003-2704-0523

Поступила в редакцию: 07.06.2024 Поступила после рецензирования: 20.06.2024 Принята к публикации: 02.04.2025

#### REFERENCES

- 1. Gasumov R.A., Gasumov E.R., Minchenko Yu.S. Features of the construction of underground storage facilities in depleted oil and gas condensate fields. *Notes of the Mining University*, 2020, vol. 244, pp. 418–427. (In Russ.) DOI: 10.31897/pmi.2020.4.
- 2. Vainshtok P.N., Nazarov V.D., Nazarov M.V. Purification of industrial wastewater using the electrochemical method. *Ecology* and industry of Russia, 2013, no. 2, pp. 18–21. (In Russ.)
- 3. Beshentsev V.A. On the issue of the possibility of burying wastewater in the subsoil. *Mining Vedomosti*, 2014, no. 12, pp. 30–42. (In Russ.)
- Gorin N.V., Kuchinov V.P., Usanov S.V., Vasiliev A.P. The use of underground mine workings for the disposal of radioactive waste of the 3rd and 4th classes. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2023, vol. 334, no. 9, pp. 128–136. (In Russ.) DOI: https://doi.org/10.18799/24131830/2023/9/4159.
- 5. Deeva T.A., Kamartdinov M.R., Kulagina T.E., Mangazeev P.V., Pankov M.V. *Hydrodynamic studies of wells*. Tomsk, TPU Publ. house, 2004. 340 p. (In Russ.)
- 6. Beshentsev V.A., Gulyaeva Yu.V. State and prospects for deep burial of wastewater in the fields of the Yamalo-Nenets Autonomous Okrug. *Bulletin of higher educational institutions*. *Oil and gas*, 2022, no. 1, pp. 12–23. (In Russ.) DOI: https://doi.org/10.31660/0445-0108-2022-1-12-23.
- Kanbetov A.Sh., Kulbatyrov D.K., Abilgazieva A.A., Shakhmanova A.K. Conditions of bottom deposit contamination in northeastern Caspian field. SOCAR Proceedings, 2023, no. 4, pp. 156–161. DOI: 10.5510/OGP20230400929.
- Lepokurova O.E., Trifonov N.S. Assessment of the applicability of geochemical geothermometers for formation waters of the Tomsk region. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, no. 12, pp. 208–218. (In Russ.) DOI: https://doi.org/10.18799/24131830/2022/12/3878.
- Gavrilov V.L., Nemova N.A., Reznik A.V., Kosarev N.S., Kolesnikov A.A. On the need for a comprehensive geo-ecological assessment of technogenically disturbed lands by mining. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2023, vol. 334, no. 10, pp. 76–87. (In Russ.) DOI: https://doi.org/10.18799/24131830/2023/10/4212.
- Lv W., Zhao J., Hao M., Liu J., Zhang Y., Zheng J., Su B., Wang Y., Huang Y. Enhancing classification and recovery of barite from waste drilling fluid by inlet particle arranging of hydrocyclone. *Journal of Water Process Engineering*, 2023, vol. 56, 104341. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.104341.
- 11. Jones R., Wakeford M., Randall L.C., Miller K., Tonin H. Drill cuttings and drilling fluids (muds) transport, fate and effects near a coral reef mesophotic zone. *Marine Pollution Bulletin*, 2021, vol. 172, pp. 112717. DOI: https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112717.
- 12. Gasumov E.R., Gasumov R.A., Pavlyukova I.V. The influence of technogenic factors on geotechnical systems and ensuring environmental safety of hydrocarbon deposit development. *Territory Neftegaz*, 2016, no. 7–8, pp. 110–115. (In Russ.)
- 13. Ivchenko M.V., Melnikov E.A. Disposal of industrial wastewater in underground gas storage facilities. *Gas industry*, 2017, no. 1 (750), pp. 112–116. (In Russ.)
- Kazbulatova G.M., Michurin S.V., Karamova A.M. Geoecological assessment of the state of surface waters of the Avzyan goldbearing region of the Republic of Bashkortostan. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, no. 8, pp. 139–152. (In Russ.) DOI: https://doi.org/10.18799/24131830/2022/8/3556.
- 15. Umurzakov R.A., Shoymuratov T.Kh., Ibragimov A.S., Khudoiberdiyev H.F. Geodynamic prerequisites and reflection of signs of fluid migration in hydrogeochemical indicators of formation water in the Bukhara-Khiva region. *SOCAR Proceedings*, 2022, no. 1, pp. 14–23. DOI: 10.5510/OGP20220100624.

- Morillas-Espana A., Lafarga T., Sanchez-Zurano A., Acien-Fernandez F.G., Gonzalez-Lopez C. Microalgae based wastewater treatment coupled to the production of high value agricultural products: current needs and challenges. *Chemosphere*, 2022, vol. 291, P. 3, 132968. DOI: https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132968.
- Costa C., Carvalho C.F., Soares A.S., Souza A.C., Bastos E.F. Guimarães E.C., Santos J.C., Carvalho T., Calderari V.H., Marinho L.S., Marques M.R. Physical and chemical characterization of drill cuttings: a review. *Marine Pollution Bulletin*, September 2023, vol. 194, part A, 115342. DOI: https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.115342.
- 18. Methodologies for developing standards for permissible discharges of pollutants into water bodies for water users. *Approved by the Order of the Ministry of Natural Resources and Environment of the Russian Federation dated December 29*, 2020. No. 1118. Moscow, 2020. 53 p. (In Russ.).
- Bulat A.V., Karelina S.A., Ivanovsky V.N., Blokhina M.G., Pyatov I.S., Vorobyova L.V., Kirpichev Yu.V., Timoshenko V.G. Rational areas of application of various types of equipment for protection against mechanical impurities. *Territory "Neftegaz"*, 2020, no. 9–10, pp. 52–63. (In Russ.)
- 20. Garaishin A.S., Kantyukov R.R. Selection of an accumulator layer for the disposal of industrial wastewater from the Arbuzovskoe underground gas storage facility. *Georesursy*, 2017, no. 19 (1), pp. 82–86. (In Russ.) DOI: http://doi.org/10.18599/grs.19.1.13.
- 21. Muller R.A., Finsterle S., Grimsich J., Baltzer R., Muller E.A., Rector J.W., Payer J., Apps J. Disposal of high-level nuclear waste in deep horizontal drillholes energies. *Energies*, 2019, no. 12, pp. 20–52. DOI: 10.3390/en12112052.
- 22. Garaishin A.S., Ruban G.N. The main criteria for choosing an accumulator layer for the disposal of industrial wastewater from the Karashur underground gas storage facility. *Georesursy*, 2010, no. 4 (36), pp. 26–29. (In Russ.)
- Ilinykh G., Fellner J., Sliusa N., Korotaev V. A life cycle assessment of drilling waste management: a case study of oil and gas condensate field in the north of western Siberia, Russia. *Sustainable Environment Research*, 2023, vol. 33:9, pp. 1–17. DOI: https://doi.org/10.1186/s4234-023-00171-0.
- 24. Semyachkov A.I., Pochechun V.A., Semyachkov K.A. Hydrogeoecological conditions of technogenic groundwater in waste disposal. *Notes of the Mining Institute*, 2023, vol. 260, pp. 168–178. DOI: 10.31897/PMI.2023.24.
- 25. Abdrakhmanov R.F. Problems of removing liquid industrial wastewater into deep aquifers. *Geological Bulletin*, 2019, no. 1, pp. 159–165. (In Russ.) DOI: http://doi.org/10.31084/2619-0087/2019-1-13.
- Chernysh Y., Chubur V., Ablieieva I., Skvortsova P., Yakhnenko O., Skydanenko M., Plyatsuk L., Roubík H. Soil contamination by heavy metals and radionuclides and related bioremediation techniques: a review. *Soil Syst.*, 2024, vol. 8 (2), no. 36. DOI: 10.3390/soilsystems8020036.
- Abdulmutalimova T.O., Ramazanov O.M., Alkhasov A.B., Gazaliev I.M. Assessment of the quality of groundwater used for domestic and drinking purposes in the Republic of Dagestan. *South of Russia: ecology, development*, 2023, no. 18 (2), pp. 92–101. (In Russ.). https://doi.org/10.18470/1992-1098-2023-2-92-101.
- 28. Gasumov E.R., Veliyev V.M. Methods for ensuring environmental safety when developing small gas condensate fields. Innovative technologies in the oil and gas industry. Problems of sustainable development. Collection of proceedings of the International Scientific and Practical Conference. Stavropol, December 1–2, 2020. Stavropol, NCFU Publ., 2020. pp. 402–412. (In Russ.)
- 29. Njuguna J., Siddique S., Bakah L.K., Piromrat S., Afoakwa K.A., Ekeh-Adegbotolu U., Oluyemi G., Yates K., Mishra A.K., Moller L. The fate of waste drilling fluids from oil & gas industry activities in the exploration and production operations. *Waste Management*, 2022, vol. 139, pp. 362–380. DOI: https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.12.025.
- Armand G., Talandier J., Dizier A., Li X.L., Levasseur S. Contribution of HADES URL to the development of the Cigéo project, the French industrial centre for geological disposal of high-level and long-lived intermediate-level radioactive waste in a deep clay formation. *Geological Society, London, Special Publications*, 2022, vol. 536, pp. 237–256. DOI: https://doi.org/10.1144/SP536-2022-98.
- 31. Well Injection of Industrial Wastes. *Environmental Geology Illinois State Geological Survey*, 1990. 135 p. DOI: http://hdl.handle.net/2142/25572.
- Trifonov N.S., Novikov D.A., Yamskikh A.A., Hydrogeological Prerequisites for industrial waste injection during the development of priority area of the Yurubcheno-Tokhomo field. *Water Resources*, 2015, vol. 42, no. 7, pp. 909–921. DOI: 10.1134/S0097807815070131.
- 33. Tikhonov A.A., Fedorov G.V., Masalimov R.M., Kashtanova L.E., Valeev E.M., Turlakov M.V. The influence of the economic efficiency of the project on the choice of technologies for the preparation of formation water used for the pressure maintenance system at LLC "RN-Purneftegaz". *Oil and Gas Business*, 2022, vol. 20, no. 4, pp. 94–100. (In Russ.)

## Information about the authors

**Ramiz A. Gasumov**, Dr. Sc., Professor, Academician of the Russian Academy of Natural Sciences, Head of Design of Oil and Gas Facilities Department, North Caucasus Federal University, 1, Pushkin street, Stavropol, 355017, Russian Federation; R.Gasumov@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0002-4700-2391

**Eldar R. Gasumov**, Cand. Sc., Associate Professor, Azerbaijan State University of Oil and Industry, 20, Azadlig vaenue, Baku, AZ1010, Azerbaijan; Doctoral Student, Azerbaijan Technical University, 25, G. Javid avenue, Baku, AZ1148, Azerbaijan; e.gasumov@gmail.com, https://orcid.org/0000-0003 -2704-0523

Received: 07.06.2024 Revised: 20.06.2024 Accepted: 02.04.2025 УДК 621.5+621.6 DOI: 10.18799/24131830/2025/5/4648 Шифр специальности ВАК: 2.6.13 Обзорная статья

# Гидравлический расчёт трубопровода отгрузки крупнотоннажных заводов сжиженного природного газа

# Ш.М. Муниров<sup>⊠</sup>, В.Б. Мельников

Российский государственный университет нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, Россия, г. Москва

# <sup>™</sup>shamil.munirov@gmail.com

Аннотация. Актуальность. По планам Правительства РФ к 2035 г. производство отечественного сжиженного природного газа должно вырасти до 80-140 млн т/год, или на 146-331 % по сравнению с показателем 2022 г. В условиях санкционного давления и ухода зарубежных лицензиаров из России для достижения столь высоких показателей производства необходимо решить вопрос самостоятельного грамотного проектирования новых производственных мощностей сжижения природного газа и их загрузочной инфраструктуры. Цель. Разработка методики гидравлического расчёта трубопровода отгрузки сжиженного природного газа на морских терминалах заводов по сжижению. Методы. Математическое моделирование, аналитические методы. Результаты и выводы. По результатам работы были обоснованы исходные параметры для гидравлического расчёта трубопровода отгрузки сжиженного природного газа, разработана методика гидравлического расчёта трубопровода отгрузки заводов сжиженного природного газа и произведена апробация разработанной методики на примере действующего загрузочного трубопровода завода Ямал СПГ. С позиции снижения образования отпарного газа во время погрузки сжиженного природного газа в танкер был произведён сравнительный анализ теплопритоков в результате сжатия сжиженного природного газа в криогенном насосе и циркуляции сжиженного природного газа в трубопроводе. Сделан вывод о целесообразности применения в технологическом проектировании загрузочного трубопровода сжиженного природного газа подхода, при котором следует стремиться к снижению давления нагнетания криогенного насоса. Разработанная методика может быть предложена в качестве дополнения в Ведомственные нормы технологического проектирования установок по производству и хранению сжиженного природного газа.

**Ключевые слова:** криогенный трубопровод, загрузка сжиженного природного газа, сжиженный природный газ, гидравлический расчёт, тепловой расчёт

**Для цитирования:** Муниров Ш.М., Мельников В.Б. Гидравлический расчёт трубопровода отгрузки крупнотоннажных заводов сжиженного природного газа // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 5. – С. 49–61. DOI: 10.18799/24131830/2025/5/4648

UDC 621.5+621.6 DOI: 10.18799/24131830/2025/5/4648 Review article

# Hydraulic calculation for loading pipeline of large-scale liquified natural gas plants

# Sh.M. Munirov<sup>⊠</sup>, V.B. Melnikov

National University of Oil and Gas «Gubkin University», Moscow, Russian Federation

<sup>™</sup>shamil.munirov@gmail.com

**Abstract.** *Relevance.* According to the plans of the Russian Government, domestic liquified natural gas production should grow to 80–140 million tons per year by 2035, or by 146–331% compared to 2022. In the context of sanctions and the with-drawal of foreign licensors from Russia, in order to achieve such high production levels, it is necessary to solve the issue of

independent competent design of new LNG plants and their loading infrastructure. *Aim.* Development of hydraulic calculation method for loading pipeline of liquified natural gas terminals. *Methods.* Methods of mathematical modeling, analytical methods. *Results and conclusions.* Based on the results of the work, the authors have justified the initial parameters for the hydraulic calculation of the liquified natural gas loading pipeline, and developed a method for the hydraulic calculation of the liquified natural gas plants loading pipeline. The developed method was tested on the liquified natural gas loading pipeline of Yamal LNG plant. From the point of boil-off gas formation reducing during liquefied natural gas loading into the tanker, the authors carried out the comparative analysis of heat flows of compression in a cryogenic pump and liquefied natural gas loading pipeline to apply an approach, in which one should strive to reduce the cryogenic pump discharge pressure. The developed methodology may be proposed as an addition to the Departmental Norms of Production Engineering of facilities for the production and storage of liquefied natural gas.

Key words: cryogenic pipeline, liquified natural gas loading, liquified natural gas, hydraulic calculation, thermal calculation

**For citation:** Munirov Sh.M., Melnikov V.B. Hydraulic calculation for loading pipeline of large-scale liquified natural gas plants. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 336, no. 5, pp. 49–61. DOI: 10.18799/24131830/2025/5/4648

# Введение

Одним из коммерчески обоснованных способов доставки природного газа является перевозка в сжиженном состоянии. Переход в жидкую форму уменьшает объём природного газа в 600 раз, что позволяет компактно его перевозить на большие расстояния морскими судами без необходимости строительства протяжённых магистральных газопроводов. Объемы мирового производства сжиженного природного газа (СПГ) на протяжении последних десятилетий сохраняют высокие темпы ежегодного прироста, который измеряется десятками процентов [1].

По данным Росстата за 2022 г. в России произведено 32,5 млн т СПГ [2]. Согласно Долгосрочной стратегии развития производства СПГ планируется нарастить к 2035 г. производство отечественного СПГ до значений в пределах 80–140 млн т/год [3], т. е. на 146–331 % по сравнению с показателем 2022 г.

Достижение столь высоких показателей производства СПГ невозможно без грамотного проектирования новых заводов СПГ и их загрузочной инфраструктуры.

Значительная доля отечественных производственных мощностей построена по проектам зарубежных лицензиаров, которые не раскрывают принципы и методики проектирования заводов СПГ. Также вследствие санкционного давления многие зарубежные проектировщики отказались от сотрудничества с российскими нефтегазовыми компаниями.

С этих позиций становится актуальной проблема независимого проектирования загрузочной трубопроводной инфраструктуры береговых заводов СПГ России.

Трубопровод отгрузки СПГ соединяет резервуар хранения и выносной причал, с которого происходит загрузка в пришвартованный танкер. Данный трубопровод работает в двух режимах: непосредственной загрузки или холостой циркуляции с целью поддержания трубопровода в охлаждённом состоянии в межрейсовый период. Также во время погрузки осуществляется возврат паров СПГ с судна в резервуар хранения по отдельному трубопроводу отпарного газа.

В настоящее время по проблеме оптимизации и гидравлического расчёта трубопроводов СПГ и других криопродуктов выполнен ряд исследований.

Так, в статье [4] рассматривается методика гидравлического расчёта трубопровода СПГ, однако трубопроводный транспорт СПГ представлен как альтернатива традиционным магистральным газопроводам. Утверждается, что гидравлический расчёт трубопровода СПГ включает в себя условие однофазности потока. Сделан вывод о том, что для расчёта распределения температуры и давления в трубопроводе СПГ можно применять те же зависимости, что и для газопровода компримированного газа, но с рядом отличий – необходимо учитывать влияние рельефа на распределение давления и производить расчёт усреднённых параметров трубопровода через меньшие интервалы длиной 5-10 км. Показано, что теплофизические свойства СПГ в широком диапазоне давлений и температур наиболее точно рассчитываются по кубическим уравнения состояния. В целом в работе [4] детально изучен вопрос расчёта физических свойств СПГ, а вопросам гидравлики СПГ уделено незначительное внимание.

В работе [5] была осуществлена попытка адаптации классического гидравлического расчета трубопровода – подбора диаметра и давления. Отмечается, что в целях безаварийной работы криогенного трубопровода рекомендуется принимать минимальное давление на 0,5–0,7 МПа выше давления насыщения. Работа не раскрывает причин выбора других граничных условий для гидравлического расчёта, что не даёт возможности оценить её в качестве исчерпывающей методики гидравлического расчёта трубопровода СПГ. В работе [6] на рассматриваемом примере осуществляется оптимизация криогенного трубопровода исходя из минимизации потерь давления и холода при течении криогенной жидкости подбором следующих параметров: диаметра трубопровода, входных давления и температуры, расхода криопродукта. Однако данных параметров недостаточно для проектирования трубопровода отгрузки заводов СПГ, необходимо также учитывать длину трубопровода, выходные температуру и давление и другие. Приведённый метод оптимизации криогенного трубопровода можно улучшить, включив в расчёты другие конструктивные и теплофизические параметры, однако это приведёт к усложнению применяемого подхода.

В исследовании [7] представлен анализ однофазного и двухфазного режимов транспортировки природного газа по трубопроводным системам и отмечается, что наименьшие гидравлические потери имеют место при дисперсно-кольцевом режиме течения. Однако для криогенных жидкостей, какой является СПГ, наличие двухфазного потока в трубопроводе нежелательно ввиду образования паровой фазы и уменьшения его пропускной способности по СПГ [8].

Также важно отметить факт отсутствия комплексных представлений и подходов в национальной базе стандартизации в области СПГ [9], в т. ч. по части проектирования технологии загрузки танкеров СПГ и трубопроводной инфраструктуры СПГ.

Основным стандартом по технологическому проектированию заводов СПГ являются нормы [10]. Однако в данном документе вопросы отгрузки СПГ ограничены рассмотрением только погрузки в автоцистерны и не предъявляют никаких требований к отгрузке с морских причалов в танкеры СПГ.

В [11–13] практически отсутствуют указания по технологическому проектированию криогенных технологических трубопроводов, а в [13] даны весьма общие, размытые требования к проектированию технологии перекачки СПГ.

Вместе с тем в [15] подчеркивается необходимость обоснования в проектной документации максимальной безопасной скорости движения перекачиваемых сред по технологическим трубопроводам и установки сигнализации по превышению безопасного предела скорости перекачки СПГ.

Так, например, в [16] указывается на то, что при проектировании трубопроводов СПГ следует принимать во внимание такие физические явления, как гидравлический удар, кавитация, образование пузырьков и двухфазный поток. Рекомендуется поддерживать загрузочный трубопровод в холодном состоянии, например, при помощи циркуляции СПГ и защиты от внешних атмосферных воздействий. Трубопровод должен быть спроектирован таким образом, чтобы обеспечить плавный поток, избегая при этом динамических нагрузок, например, гидравлических ударов или вибраций, а также неблагоприятного воздействия статического электричества. Расчеты перепада давления должны проводиться с целью проверки условий давления, необходимых для правильной работы насосов в системах погрузки и разгрузки судов. Потери давления в трубопроводе должны рассчитываться с использованием проверенных методов (например, формулы Кольбрука для коэффициента гидравлического сопротивления).

Американский стандарт [17] не даёт каких-либо чётких рекомендаций по технологическому проектированию процесса загрузки судов СПГ и направлен на обеспечение пожарной защиты и безопасности на производствах СПГ.

Иностранные стандарты на технологические трубопроводы [18, 19] охватывают очень широкий перечень производств, и в них приводятся общие требования к технологическим трубопроводам.

Анализ современной отечественной литературы и отраслевых стандартов указывает на необходимость разработки методики гидравлического расчёта трубопровода отгрузки СПГ на морских терминалах и её возможное интегрирование в отечественные нормы технологического проектирования заводов СПГ.

С этих позиций в данной работе поставлена цель по формулированию методики гидравлического расчёта трубопровода отгрузки на морских терминалах заводов СПГ.

## Объект исследования

Для создания методики гидравлического расчёта целесообразным является осуществление анализа физико-химических процессов, происходящих в трубопроводе отгрузки СПГ во время его эксплуатации.

Любой технологический процесс, происходящий в оборудовании, обусловлен физикохимическими свойствами перекачиваемой среды. В перекачиваемом СПГ содержание метана в зависимости от состава исходного природного газа и технологии производства СПГ обычно составляет не менее 75 % [20], поэтому главным образом свойства СПГ определяются свойствами метана. В табл. 1 приведены основные физические свойства метана при атмосферном давлении.

**Таблица 1.** Физические свойства метана при атмосферном давлении [21]

Table 1.	Physical	properties	of	methane	at	atmospheric
	pressure	[21]				

Температура Temperature, °C		Плотности Density, l	ь, кг/м <sup>3</sup> кg/m <sup>3</sup>	Теплота, Дж/г Heat, J/g		
кипения	плавления	жидкости	льда	испарения	плавления	
boiling	melting	liquid	ice	evaporation	melting	
-161,5	-182,5	424,5	500	509,5	58,6	

Течение СПГ в трубопроводе связано с неизбежными теплопритоками из окружающей среды и диссипативными потерями, которые в сочетании с малым значением теплоты фазовых переходов и узким температурным диапазоном существования продукта в жидком виде приводят к непрерывному изменению его параметров фазового состояния и обуславливают возможность фазовых переходов и потери СПГ во время течения его в трубопроводе при отгрузке в танкер. В связи с изложенным возникает необходимость оптимизации скорости движения СПГ по трубопроводам, при которой его прогрев будет минимальным, т. е. потери холода будут сведены к минимуму. В случае недостаточного первоначального охлаждения СПГ в ёмкости хранения в потоке СПГ в трубопроводе может образоваться паровая фаза, и параметры течения флюида существенно изменятся. Образование паровых полостей в застойных зонах криогенных трубопроводов также может происходить, если местная скорость течения СПГ недостаточна.

Наличие самой совершенной изоляции не исключает теплообмена между транспортируемой криогенной жидкостью и окружающей средой. В то же время применение изоляции современных типов и предварительного охлаждения потока СПГ, а также повышение давления в трубопроводной системе позволяет при установившемся течении транспортировать криогенный поток СПГ на требуемые расстояния по трубопроводам. Когда на некотором расстоянии в трубопроводе текущая жидкая фаза СПГ начинает испаряться до установления состояния фазового равновесия (насыщения), при сохранении перепада давлений расход СПГ будет уменьшаться.

С этих позиций трубопроводы отгрузки СПГ большую часть времени эксплуатируются в охлажденном состоянии на стационарном режиме течения однофазного потока не кипящей жидкости. Данный режим является наиболее благоприятным: при этом трубопровод имеет большую пропускную способность, надежно регулируется распределение жидкости при разветвленной трубопроводной системе и обеспечивается минимальное сопротивление линии при заданной производительности [22].

Таким образом, гидравлический расчёт параметров однофазного потока СПГ связан с определением не только потерь давления, но и температуры потока СПГ и температуры его насыщения.

## Методика гидравлического расчёта трубопровода отгрузки СПГ

В [23] отмечается, что для расчёта давления в любом сечении криогенного трубопровода можно использовать уравнения, применяемые для трубопроводов высококипящих жидкостей, поэтому ис-

ходя из уравнений Бернулли и Дарси–Вейсбаха диаметр криогенного трубопровода в метрах может быть рассчитан по формуле:

$$d = \sqrt[5]{\frac{1,02 \cdot 8\lambda l \rho Q^2}{\pi^2 (p_{\text{BX}} - p_{\text{BLAX}})}},$$
(1)

где d – внутренний диаметр трубопровода, м; 1,02 – коэффициент, учитывающий местные сопротивления трубопровода, которые обычно не превышают 2 % от общей длины трубопровода [24];  $\lambda$  – коэффициент гидравлического сопротивления (КГС) трубопровода, безразмерный; l – длина трубопровода, м;  $\rho$  – плотность жидкости при рабочих условиях, кг/м<sup>3</sup>; Q – расход жидкости при рабочих условиях, м<sup>3</sup>/с;  $p_{\rm въ x}$  и  $p_{\rm вых}$  – давление на входе и выходе из трубопровода, Па.

Вначале необходимо определиться с расходом СПГ по криогенному трубопроводу, который обусловлен вместимостью будущих танкеров СПГ, приходящих на загрузку. Их вместимость может варьироваться от 1000 до 266000 м<sup>3</sup> [1, 25]. Расход СПГ во время погрузки определяется исходя из утверждения, что время погрузки или разгрузки одной партии СПГ составляет от 12 до 16 ч [26]. Данный временной отрезок может быть продиктован тем фактом, что элементарным временным интервалом ставки фрахта и портовых сборов являются одни сутки, т. е. оставшиеся 8–12 ч в сутках отводятся на остальные портовые операции (буксировка, швартовка, оформление судна и прочее).

Затем нужно решить вопрос о количестве загрузочных ниток трубопровода. На малотоннажных заводах в целях загрузки применяется одна линия большего диаметра и вторая линия – рециркуляционная – меньшего диаметра для «холостой» циркуляции СПГ в режиме ожидания в межрейсовый период. На крупнотоннажных заводах для загрузки используют две параллельные линии одинакового диаметра, одна из которых в межрейсовый период работает как рециркуляционная. Поэтому на малотоннажных заводах для определения диаметра трубопровода отгрузки используется весь расход загрузки танкера, а на крупнотоннажных – половина расхода загрузки.

Далее необходимо найти длину криогенного трубопровода. Она определяется исходя из размещения выносного причала и резервуара СПГ. Выбор места причала обусловлен рельефом дна прибрежной зоны, т. к. танкеры СПГ требуемой вместимости должны иметь возможность подойти к причалу.

Следующим шагом является выбор давления в начале и в конце трубопровода.

По данным [27] известно, что давление нагнетания криогенных насосов для типовой крупнотон-

нажной линии сжижения составляет от 7 до 10 бар. Следует заметить, что выбор меньшего давления нагнетания позволяет снизить потери холода в результате сжатия СПГ в насосе, но, с другой стороны, требует прокладки трубопровода большего диаметра для обеспечения требуемого значения давления в конечной точке, что приведёт к увеличению потерь холода в результате теплопритока к трубопроводу. Соотношение потерь холода в зависимости от выбора того или иного давления нагнетания будет рассмотрено ниже.

Обычно танки морских газовозов работают при давлении газовой шапки около 0,3 бар (изб.) [28].

Также важно отметить, что погрузка в танки судов осуществляется нижним наливом, и для наполнения танков следует создать противодавление возможному столбу жидкости. По иллюстрации из [29. С. 50] уровень в танках может достигать 39 м.

С этих позиций в качестве давления в конце трубопровода отгрузки рекомендуется принять значение 2,3 бар (изб.), или абсолютное давление 3,3 бар.

В качестве рабочих условий следует принять средние между началом и концом трубопровода давление и температуру, при которых рассчитывается плотность жидкости.

Как отмечалось выше, в [16] для расчёта КГС трубопроводов СПГ рекомендуется формула Кольбрука как универсальная для различных типов турбулентного режима течения [30]:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \cdot \lg \cdot \left(\frac{2.5}{\operatorname{Re}\sqrt{\lambda}} + \frac{\Delta}{3,7d}\right),\tag{2}$$

где Re – число Рейнольдса, безразмерно;  $\Delta$  – эквивалентная шероховатость, мм; d – внутренний диаметр трубы, мм.

После получения расчётного внутреннего диаметра трубопровода следует выбрать стандартный диаметр трубопровода из [31, 32], наиболее близкий к расчётному.

После выполнения гидравлического расчёта и выбора диаметра трубопровода СПГ следует выполнить проверку на максимальную безопасную скорость перекачки СПГ (не более 12 м/с [33]) во избежание накопления статического заряда, дополнительного теплопритока и испарения в результате турбулизации потока. Скорость потока в трубопроводе определяется по формуле:

$$\upsilon = \frac{4Q}{\pi d^2},\tag{3}$$

где v – скорость перекачки, м/с; Q – расход жидкости при рабочих условиях, м<sup>3</sup>/с; d – внутренний диаметр трубопровода, м.

Далее необходимо выполнить расчёт толщины слоя теплоизоляции по [34] и затем осуществить проверочный расчёт полученного трубопровода на

соответствие условию, при котором температура продукта в конечной точке трубопровода должна быть ниже температуры насыщения.

# Расчёт диаметра трубопровода отгрузки на заводе Ямал СПГ

В последующем материале статьи рассматривается гидравлический расчёт на примере трубопровода отгрузки товарной продукции завода Ямал СПГ.

Перед непосредственным гидравлическим расчётом необходимо определиться с составом перекачиваемого СПГ, т. к. он является определяющим для применяемых в формулах значений физических свойств криогенной жидкости.

В качестве товарной продукции завода Ямал СПГ принят СПГ марки Б по стандарту [20]. Принятый состав СПГ приведён в табл. 2.

**Таблица 2.** Подобранный для исследования состав сжиженного природного газа

Table 2.	Liquified	natural	gas	composition	selected	for
	the study					

Компонент/Component	Содержание, мольн. %/Content, mole %
Метан/Methane	95,0
Этан/Ethane	0,8
Пропан/Propane	2,0
Бутан/Butane	2,0
Азот/Nitrogen	0,2

Далее необходимо было определиться с длиной трубопровода отгрузки СПГ. С этой целью с использованием Google карт по спутниковым снимкам производственной зоны завода Ямал СПГ (рис. 1) была найдена длина загрузочного трубопровода. Как видно из рис. 1, длина трубопровода отгрузки СПГ составляет 2250 м.

Затем для гидравлического расчёта необходимо было определиться с производительностью трубопровода отгрузки СПГ. С этой целью воспользовались характеристикой используемых танкеров по объёму перевозки СПГ. Так, в частности, используемые танкеры класса Arc7 для завода Ямал СПГ вмещают около 172600 м<sup>3</sup> СПГ [35]. Так как завод Ямал СПГ является крупнотоннажным, примем время загрузки одной партии 16 ч и количество используемых для загрузки линий равным двум. Тогда общий расход загрузки составит 10788 м<sup>3</sup>/ч, а расход погрузки по одной линии равен 5394 м<sup>3</sup>/ч.

Давление на входе в линию принято 7 бар.

Исходные данные для расчёта диаметра трубопровода отгрузки СПГ представлены в табл. 3.

Используя программный комплекс, были рассчитаны коэффициент вязкости и плотность СПГ с составом, указанным в табл. 2, при рабочих условиях 0,136 мПа·с и 450,5 кг/м<sup>3</sup>.



**Рис. 1.** Выделенный трубопровод отгрузки на спутниковом снимке завода Ямал СПГ с указанием длины (снимок Google Kapmu)

- Fig. 1. Dedicated loading pipeline on a satellite image of the Yamal LNG plant with an indication of the length (image from Google Maps)
- Таблица 3. Исходные данные для расчёта диаметра трубопровода отгрузки при давлении нагнетания 7 бар
- Table 3.
   Initial data for calculating the diameter of the loading pipeline at a discharge pressure of 7 bar

Длина, м /Length, m	2250
Расход одной линии, м³/ч/One line flowrate, m³/h	5394
Давление на входе, бар/Inlet pressure, bar	7,00
Давление на выходе, бар/Outlet pressure, bar	3,30
Рабочая температура/Operating temperature, °C	-160
Рабочее давление, бар/Operating pressure, bar	5,15

По формуле (2) был произведён расчёт КГС трубопровода отгрузки СПГ (табл. 4).

С использованием зависимости (1) был рассчитан внутренний диаметр трубопровода СПГ (табл. 5).

Таблица 4.	Расчёт	коэфф	бициента	гидра	влического	со-
	против.	ления	трубопро	вода	отгрузки	при
	давлени	и нагн	етания 7	бар		

Table 4.	Calculation	of the	loading	pipeline	hydraulic	re-
	sistance coe	fficient	at a disch	narge pres	ssure of 7 b	ar

<i>Q</i> , м³/ч/m³/h	<i>d,</i> мм/mm	Δ, мм/mm	Re	λ
1,50	543	0,01	11 663 537	0,0094

Из [31] был подобран ближайший к расчётному стандартный внутренний диаметр трубы (табл. 6).

После гидравлического расчёта трубопровода отгрузки СПГ необходимо произвести проверку на максимальную скорость перекачки.

Расчёт скорости перекачки по формуле (3) представлен в табл. 7.

Таблица 5.	Расчёт б	диаметра	трубопр	овода	отгрузки	при	давлении	нагнетания	7 бар
------------	----------	----------	---------	-------	----------	-----	----------	------------	-------

Table 5.	Calculation of the loading pipeline diameter	er at a discharge pressure of 7 bar
----------	--	-------------------------------------

1	l se /m	Q	)	<i>ρ</i> , кг/м³	$p_{I}$	3X	$p_{\scriptscriptstyle \mathrm{B}}$	ых		d
Λ	<i>I</i> , M/III	м³/ч m³/h	м³/с m³/s	kg/ m <sup>3</sup>	бар/bar	Па/Ра	бар/bar	Па/Ра	м/m	мм/mm
0,0094	2250	5394	1,50	450,5	7,0	700000	3,3	330000	0,543	543

- Таблица 6. Подобранный стандартный внутренний диаметр трубопровода отгрузки завода Ямал СПГ при давлении нагнетания 7 бар
- Table 6.Selected standard inner diameter of the Yamal<br/>LNG plant loading pipeline at a discharge pres-<br/>sure of 7 bar

Диаметр мм/Diameter, mm				
Расчётный внутренний	Стандартный внутренний			
Estimated inner	Standard inner			
543	604			

- Таблица 7. Расчёт скорости перекачки сжиженного природного газа в трубопроводе отгрузки при давлении нагнетания 7 бар
- Table 7.
   Calculation of the liquified natural gas velocity in the loading pipeline at a discharge pressure of 7 bar

	Q	d w/m	n Malmla	
м <sup>3</sup> /ч/m <sup>3</sup> /h	м <sup>3</sup> /c/m <sup>3</sup> /s	<i>u</i> , м/ш	<i>U</i> , M/C/III/S	
5394	1,50	0,604	5,24	

Итак, полученная скорость перекачки 5,24 м/с меньше максимальных 12 м/с, что говорит о безопасности подобранной конструкции трубопровода с точки зрения накопления статического заряда.

Далее следует определить толщину теплоизоляции. Исходные данные для расчёта толщины теплоизоляции трубопровода отгрузки завода Ямал СПГ представлены в табл. 8.

В соответствии с [34] по нормированной плотности теплового потока была рассчитана толщина изоляции для трубопровода отгрузки СПГ. Полученная толщина теплоизоляции равна 230 мм.

Затем нужно произвести проверочный расчёт на соответствие условию, при котором температура СПГ в конечной точке трубопровода должна быть ниже температуры насыщения. С этой целью в программном комплексе Aspen HYSYS была составлена модель трубопровода отгрузки завода Ямал СПГ. Для расчёта свойств СПГ использовано уравнение состояния Пенга–Робинсона. В качестве метода расчёта потерь давления однофазного потока используется уравнение Дарси–Вейсбаха. Для определения коэффициента теплопередачи выбрана методика HTFS.

В табл. 9 приведены исходные данные для проверочного расчёта трубопровода отгрузки СПГ.

Результаты проверочного расчёта приведены в табл. 10.

#### Таблица 8. Исходные данные для расчёта толщины теплоизоляции при давлении нагнетания 7 бар

 Table 8.
 Initial data for calculating the thickness of thermal insulation at a discharge pressure of 7 bar

Внутренняя температура Inner temperature, °C	-160
Температура окружающей среды Ambient temperature, °C	-4
Район размещения Location region	Крайний Север Far North
Месторасположение трубопровода Pipeline location	на открытом воздухе in open air
Скорость ветра, м/c/Wind speed, m/s	10
Теплопроводность теплоизоляции, Вт/(м·°C) Thermal conductivity of thermal insulation, W/(m·°C)	0,025

Таблица 9. Исходная информация для проверочного расчёта трубопровода отгрузки сжиженного природного газа при давлении нагнетания 7 бар

Table 9.Source information for the verification calcula-<br/>tion of the liquified natural gas loading pipeline<br/>at a discharge pressure of 7 bar

Длина линии, м/Line length, m	2250
Средняя температура воздуха/Average air temperature, °C	-4
Теплопроводность изоляции, Вт/(м·К) Insulation thermal conductivity, W/(m·K)	0,025
Толщина теплоизоляции, мм Thickness of the thermal insulation, mm	230
Внешний диаметр трубы, мм/Pipe outer diameter, mm	610
Внутренний диаметр трубы, мм/Pipe inner diameter, mm	604
Давление в начальной точке, бар/Inlet pressure, bar	7,0
Температура в начальной точке/Inlet temperature, °C	-163,0
Расход загрузки, м³/ч/Loading rate, m³/h	5394

Таблица 10. Результаты проверочного расчёта трубопровода отгрузки сжиженного природного газа при давлении нагнетания 7 бар

Table 10.Verification calculation results of the liquified<br/>natural gas loading pipeline at a discharge pres-<br/>sure of 7 bar

Давление в конечной точке, бар/Outlet pressure, bar	4,80
Температура в конечной точке/Outlet temperature, °C	-162,9
Температура начала кипения в конечной точке Onset temperature of boiling, °C	-138,4

Как видно из результатов проверочного расчёта, давление в конечной точке трубопровода оказалось на 1,5 бар выше закладываемого в гидравлический расчёт, которое равно 3,3 бар. Это обусловлено подбором большего диаметра трубы из стандартного ряда. Полученный прогрев СПГ составил незначительные 0,1 °C. Температура насыщения (температура начала кипения) в конечной точке трубопровода на 24,5 °C превосходит температуру СПГ в этой же точке трубопровода. Таким образом, кипение СПГ при установившемся режиме погрузки исключено, обеспечивается однофазное течение жидкости.

Однако по результатам расчётов следует заметить, что имеется значительный запас по максимальной допустимой скорости перекачки (табл. 7). Поэтому возникает вопрос: «Имеется ли возможность подобрать меньший диаметр и как это отразится на работе трубопровода?» Для этого можно подобрать насос с давлением нагнетания побольше – до 10 бар.

Произведём расчёты диаметра трубопровода при давлении в начале трубопровода, равном 10 бар. Исходные данные для расчёта представлены в табл. 11.

Таблица	11.	Исходные	данн	ые	для	расчёта	диаметра
	m	рубопрово	да	ота	грузк	и при	давлении
	н	агнетания	10 ба	р			

 Table 11.
 Initial data for calculating the diameter of the loading pipeline at a discharge pressure of 10 bar

Длина, м/Length, m	2250
Расход одной линии, м³/ч/Flowrate of one line, m³/h	5394
Давление на входе, бар/Inlet pressure, bar	10,00
Давление на выходе, бар/Outlet pressure, bar	3,30
Рабочая температура/Operating temperature, °C	-160
Рабочее давление, бар/Operating pressure, bar	6,65

С использованием зависимости (1) был заново рассчитан внутренний диаметр трубопровода СПГ при давлении в начальной точке 10 бар и из [31] был подобран ближайший к расчётному стандартный внутренний диаметр трубы (табл. 12).

- Таблица 12. Подобранный стандартный внутренний диаметр трубопровода отгрузки завода Ямал СПГ при давлении нагнетания 10 бар
- **Table 12.**Selected standard inner diameter of the Yamal<br/>LNG plant loading pipeline at a discharge pres-<br/>sure of 10 bar

Диаметр мм/Diameter, mm			
Расчётный внутренний Стандартный внутренний			
Estimated inner	Standard inner		
483	502		

Расчёт скорости перекачки по формуле (3) представлен в табл. 13.

Итак, полученная скорость перекачки 7,59 м/с меньше максимальных 12 м/с, что говорит о безопасности подобранной конструкции трубопровода с точки зрения накопления статического заряда.

Таблица	13.	Расчёт	скор	ости	перекачки	СЖ	иженного
	n	риродног	о газ	ва в	трубопрово	эде	отгрузки
	n	ри давлен	нии в	нача	льной точке	e 10	бар

Table 13.Calculation of the liquified natural gas velocity in<br/>the loading pipeline at a discharge pressure of<br/>10 bar

	Q		n n la lm la
м³/ч/m³/h	м <sup>3</sup> /c/m <sup>3</sup> /s	<i>u</i> , м/ш	<i>U</i> , M/C/III/S
5394	1,50	0,502	7,59

По результатам расчётов имеем два варианта конструкции трубопровода (табл. 14).

Таблица 14. Варианты конструкции трубопровода Table 14. Pipeline design options

	0 1	
Варианты	Внутренний	Давление
конструкции	диаметр, мм	нагнетания, бар
Design options	Inner diameter, mm	Discharge pressure, bar
1	604	7
2	502	10

Криогенный насос с более высоким давлением нагнетания при одинаковом расходе СПГ и давлении на всасывающей линии будет потреблять большую мощность, а потребляемая мощность в зависимости от коэффициента полезного действия (КПД) будет расходоваться на полезную работу сжатия и диссипативные потери в насосе. Данные диссипативные потери будут обуславливать прогрев сжимаемого потока СПГ.

Очевидно, что при использовании варианта 1 прогрев СПГ в результате сжатия в насосе будет ниже по причине меньшего давления нагнетания, но увеличится теплоприток к трубопроводу из-за большего диаметра. По варианту 2 ситуация обратная.

Для окончательного выбора диаметра трубопровода следует составить сопряжённую модель «насос–трубопровод» и сравнить потери холода по обоим вариантам конструкции.

В программном комплексе Aspen HYSYS построена модель «насос-трубопровод». Схема модели представлена на рис. 2.

Сопряжённая расчётная модель «насострубопровод» в программе Aspen HYSYS включает в себя расчёт следующих величин.

Полезная мощность насоса в единице измерения Вт определяется зависимостью:

$$W_{use} = (p_{out} - p_{in}) \cdot Q_{op}$$

где  $p_{out}$  и  $p_{in}$  – давление на нагнетательной и всасывающей линии насоса, Па;  $Q_{op}$  – объёмный расход СПГ при рабочих условиях, м<sup>3</sup>/с.



Рис. 2. Схема модели «насос-трубопровод»: 0f – поток сжиженного природного газа на всасывающей линии насоса; Ритр – криогенный насос; N – мощность, потребляемая насосом; 1f – поток сжиженного природного газа на нагнетании насоса; PIPE – трубопровод сжиженного природного газа; Q – теплоприток к трубопроводу; 2f – поток сжиженного природного газа в конечной точке трубопровода

**Fig. 2.** Scheme of the pump-pipeline model: Of – liquified natural gas flow on the pump suction line; Pump – cryogenic pump; N – power consumption by the pump; 1f – liquified natural gas flow at the pump injection; PIPE – liquified natural gas pipeline; Q – heat gain to the pipeline; 2f – liquified natural gas flow at the end point of the pipeline

Потребляемая насосом мощность рассчитывается по формуле:

$$W_{cons} = \frac{W_{use}}{\eta} \cdot 100\%,$$

где  $\eta$  – КПД насоса, %.

Соответственно, теплоприток к сжимаемом потоку СПГ в результате диссипативных потерь в насосе будет определяться формулой:

$$Q_{dis} = W_{cons} \cdot \frac{100\% - \eta}{100\%}.$$

Общий теплоприток к потоку СПГ, перекачиваемому через насос и трубопровод отгрузки, определяется формулой:

$$Q_{total} = Q_{dis} + Q_{pipe},$$

где  $Q_{pipe}$  – тепловой поток к трубопроводу СПГ, рассчитываемый по методике HTFS, Вт.

**Таблица 15**. Исходные данные для моделирования **Table 15**. Initial data for modeling

Параметры модели		Bариант Option		
Model parameters	1	2		
Расход СПГ, м³/ч/LNG flowrate, m³/h	5394	5394		
Давление всасывающей линии насоса, бар Pump suction pressure, bar	1,2	1,2		
Температура на всасывающей линии насоса Pump suction temperature, °C	-163	-163		
КПД насоса/Pump efficiency, %	85	85		
Давление нагнетательной линии насоса, бар Pump discharge pressure, bar	7,0	10,0		
Стандартный внутренний диаметр, мм Standard inner diameter, mm	604	502		
Длина трубопровода, м/Pipeline length, m	2250	2250		
Толщина теплоизоляции, мм/Isolation thickness, mm	230	230		

Исходные данные для моделирования приведены в табл. 15.

Результаты расчётов по рассматриваемым вариантам конструкции трубопровода представлены в табл. 16 и на рис. 3.

Таблица 16	<b>5.</b> Результаты моделирования
Table 16.	Simulation results

Полученные значения		Bариант Option		
Obtained values	1	2		
Температура на нагнетательной линии насоса Pump discharge temperature, °C	-162,8	-162,7		
Температура в конечной точке трубопровода Pipeline outlet temperature, °C	-162,7	-162,4		
Давление в конечной точке трубопровода, бар Pipeline outlet pressure, bar	4,80	4,40		
Потребляемая насосом мощность, кВт Pump power consumption, kW	1023	1552		
Теплоприток от диссипативных потерь в насосе, кВт Pump dissipative losses heating, kW	153	233		
Теплоприток к трубопроводу, кВт Pipeline heat gain, kW	100	87		
Общий теплоприток, кВт/Total heat gain, kW	253	319		



**Рис. 3.** Диаграмма распределения теплопритоков по вариантам

Fig. 3. Diagram of the distribution of heat flows by options

По результатам расчётов видно, что при проектировании загрузочного трубопровода СПГ выбор повышенного давления нагнетания и соответствующего меньшего диаметра трубопровода приводит к увеличению общего теплопритока и прогрева потока СПГ: общий теплоприток по варианту 2 с большим давлением и меньшим диаметром превышает теплоприток варианта 1 на 66 кВт, или на 26,1 %. Главным образом эта разница обусловлена диссипативными потерями в насосе: теплоприток от сил диссипации в насосе по варианту 2 превосходит этот же показатель варианта 1 на 80 кВт, или на 52,3 %. Экономия холода по варианту 2 за счёт исключительно снижения диаметра трубопровода составила 13 кВт, т. е. теплоприток к трубопроводу по варианту 2 ниже того же показателя варианта 1 на 13 %.

Также следует отметить, что упомянутые теплопритоки обуславливают образование значительных объёмов отпарного газа в загружаемом танкере. Возврат данных паров низкого давления экономически нецелесообразен, поэтому в зависимости от местных экологических норм их приходится утилизировать на факеле, отправлять на повторное сжижение или использовать в качестве топлива для выработки электроэнергии [28].

С этих позиций при рассмотрении конструкций загрузочных трубопроводов СПГ одинаковой производительности и протяжённости, но различных диаметров и давлений нагнетания рекомендуется выбирать трубопровод с большим диаметром и меньшим давлением нагнетания по соображениям экономии холода и снижения образования отпарных газов во время погрузки.

## Заключение

Предложенная методика гидравлического расчёта криогенного трубопровода отгрузки береговых заводов сжиженного природного газа была апробирована на примере действующего производственного объекта – трубопроводе отгрузки завода Ямал СПГ. Полученные результаты проведённых исследований и расчётов указывают на возможность использования разработанной методики для гидравлических расчётов и выбора трубопроводов отгрузки береговых заводов сжиженного природного газа и позволяют отметить следующее.

Расход сжиженного природного газа при погрузке определяется исходя из вместимости танкера и ожидаемого времени погрузки, которое может составлять от 12 до 16 ч. Данный временной отрезок может быть продиктован тем фактом, что элементарным временным интервалом ставки портовых сборов являются одни сутки, т. е. общее время нахождение танкера сжиженного природного газа в акватории порта не должно превышать одних суток.

Длина трубопровода отгрузки обусловлена расстоянием между резервуаром сжиженного природного газа и вынесенным в море причалом, размещение которого определяется рельефом дна прибрежной зоны, позволяющим танкерам требуемой вместимости пришвартоваться к причалу. Давление в начале трубопровода отгрузки задаётся исходя из давления нагнетания подобранного криогенного насоса. С целью снизить прогрев СПГ в результате сжатия в насосе следует подбирать насос с наименьшим возможным давлением нагнетания. Однако это потребует подбора трубопровода с большим диаметром.

По поводу варианта подбора насоса с более высоким давлением нагнетания и трубопровода с меньшим диаметром следует заметить, что на примере гидравлического расчёта трубопровода отгрузки завода Ямал СПГ очевидно, что последний вариант приведёт к ощутимому увеличению количества выделяемого отпарного газа во время загрузки, утилизация которого экономически невыгодна и потребует, в свою очередь, строительства трубопровода возврата отпарного газа повышенной производительности.

Давление в конце трубопровода ограничено наибольшим рабочим давлением танков морских газовозов 0,3 бар (изб.) и гидростатическим давлением наивысшего столба жидкости в них.

Коэффициент гидравлического сопротивления трубопроводов сжиженного природного газа рекомендуется определять по формуле Кольбрука.

После гидравлического расчёта необходимо выполнить проверку на максимальную безопасную скорость перекачки (не более 12 м/с) во избежание накопления статического заряда, дополнительного теплопритока и испарения в результате чрезмерной турбулизации потока.

Затем следует произвести расчёт теплоизоляции и проверочный расчёт на соответствие условию превышения температуры насыщения над температурой СПГ в конечной точке трубопровода.

Исходя из полученных результатов для трубопровода отгрузки завода Ямал СПГ установлено, что рассчитанный по разработанной методике трубопровод имеет запас по давлению и температуре сжиженного природного газа в конце трубопровода, а также по скорости перекачки, что представляет определённый потенциал для возможной будущей реконструкции и модернизации береговой загрузочной инфраструктуры заводов.

Таким образом, разработанная методика гидравлического расчёта трубопровода отгрузки сжиженного природного газа также может быть предложена для использования в качестве дополнения в Ведомственные нормы технологического проектирования установок по производству и хранению сжиженного природного газа [10].

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. 2023 World LNG Report. London: IGU, 2023. URL: https://www.igu.org/resources/lng2023-world-lng-report/ (дата обращения 18.12.2023).
- 2. Динамика промышленного производства в 2022 году. М.: Росстат, 2023. URL: https://rosstat.gov.ru/folder/313/document/196621 (дата обращения 30.08.2023).
- 3. Долгосрочная программа развития производства сжиженного природного газа в Российской Федерации: распоряжение Правительства РФ от 16 марта 2021 г. № 640-р. М.: Правительство Российской Федерации, 2021. URL: http://static.government.ru/media/files/l6DePkb3cDKTgzxbb6sdFc2npEPAd7SE.pdf (дата обращения 30.08.2023).
- Ильин М.С. Методика расчёта технологических параметров газопровода для сжиженного природного газа // Транспорт и хранение углеводородного сырья. Нефтегазовый терминал: материалы Международной научно-технич. конф. – Тюмень, 25–26 апреля 2019. – Тюмень: Тюмен. индустр. ун-т, 2019. – С. 74–83.
- 5. Воронов В.А., Карякина Е.Д., Ахмеров Э.В. Анализ технических решений в области транспорта и хранения сжиженного природного газа // Вестник Международной академии холода. 2019. № 3. С. 15–22.
- 6. Зайцев А.В., Логвиненко Е.В. Решение задачи оптимизации криогенного трубопровода с помощью метода поиска Парето-оптимального решения // Вестник Международной академии холода. 2015. № 2. С. 55–60.
- 7. Воронов В.А., Мартыненко Я.В. Сравнительный анализ однофазного и двухфазного режимов транспортировки природного газа по трубопроводным системам // Международный научно-исследовательский журнал. 2017. № 4-4 (58). С. 28–34.
- Shammazov I., Karyakina E. The LNG flow simulation in stationary conditions through a pipeline with various types of insulating coating // Fluids. – 2023. – Vol. 8. – № 2. – P. 68. DOI: 10.3390/fluids8020068.
- Фёдорова Е.Б. Комплексное научно-технологическое обоснование производства сжиженного природного газа: дис. ... д-ра техн. наук. – М., 2019, 360 с. URL: https://www.gubkin.ru/diss2/files/Dissertation\_Fedorova\_EB.pdf (дата обращения 30.08.2023).
- 10. ВНТП 51-1-88. Ведомственные нормы технологического проектирования установок по производству и хранению сжиженного природного газа, изотермических хранилищ и газозаправочных станций (временные). – М.: МИНГАЗПРОМ СССР, 1988. – 39 с.
- 11. Руководство по безопасности «Рекомендации по устройству и безопасной эксплуатации технологических трубопроводов». Серия 3 Выпуск 67. М.: ЗАО «Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности», 2013. 194 с.
- 12. ГОСТ 32569-2013. Трубопроводы технологические стальные. Требования к устройству и эксплуатации на взрывопожароопасных и химически опасных производствах. М.: Стандартинформ, 2015. 185 с.
- 13. ОСТ 26-04-1221-75. Трубопроводы криогенные. Общие технические требования. М.: ОАО «НИИхиммаш», 1998. 35 с.
- 14. ГОСТ Р 56352-2015. Нефтяная и газовая промышленность. Производство, хранение и перекачка сжиженного природного газа. Общие требования безопасности. М.: Стандартинформ, 2015. 22 с.
- 15. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасности объектов сжиженного природного газа». М.: Ростехнадзор, 2022, 20 с. URL: https://docs.cntd.ru/document/573140265 (дата обращения 30.08.2023).
- 16. BS EN 1473:2007. Installation and equipment for liquefied natural gas. Design of onshore installations. London: BSI, 2007. 132 p.
- 17. NFPA 59A-2019. Standard for the production, storage, and handling of liquefied natural gas (LNG). Quincy: NFPA, 2019. 93 p.
- 18. ASME B31.3-2022. Process piping. ASME code for pressure piping, B31. New York: ASME, 2023. 546 p.
- 19. ASME B31.4-2022. Pipeline transportation systems for liquids and slurries, B31. New York: ASME, 2022. 116 p.
- 20. ГОСТ 34894-2022. Газ природный сжиженный. Технические условия. М.: РСТ, 2022. 12 с.
- 21. Rumble J., Bruno T., Doa M. CRC handbook of chemistry and physics. 104th ed. / Ed. by J. Rumble. Boca Raton: CRC Press, 2023. 1604 p.
- 22. Исакович Р.Я., Логинов В.И., Попадько В.Е. Автоматизация производственных процессов нефтяной и газовой промышленности. М.: Недра, 1983. 424 с.
- 23. Криогенные системы: В 2 т. Т. 2. Основы проектирования аппаратов, установок и систем / А.М. Архаров, И.А. Архаров, В.П. Беляков, В.Л. Бондаренко, Е.И. Микулин, Ю.В. Никифоров, В.Г. Пронько, Ю.Г. Писарев, М.Ю. Савинов, В.Ю. Семенов, А.И. Смородин, Н.В. Филин, В.Ю. Шадрина, Ю.А. Шевич, Э.Ф. Шургальский / под ред. А.М. Архарова, А.И. Смородина. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1999. 710 с.
- 24. Типовые расчёты при проектировании и эксплуатации нефтебаз и нефтепроводов / П.И. Тугунов, В.Ф. Новосёлов, А.А. Коршак, А.М. Шаммазов. Уфа: ООО «ДизайнПолиграфСервис», 2002. 658 с.
- 25. Global optimal vessel capacity for LNG production and transportation / C. Igboanusi, H. Amuji, O. Onukwube, N. Chikadibia // Journal of Sustainable Development of Transport and Logistics. 2022. Vol. 7. № 1. P. 82–89. DOI: 10.14254/jsdtl.2022.7-1.7.
- 26. Molnar G. Economics of gas transportation by pipeline and LNG // The Palgrave Handbook of International Energy Economics / Eds. M. Hafner, G. Luciani Cham: Palgrave Macmillan, 2022. P. 23–57. DOI: 10.1007/978-3-030-86884-0\_2.
- Coyle D., Patel V. Processes and pump services in the LNG industry // Proceedings of the 22nd International Pump Users Symposium. – Texas A&M University: Turbomachinery Laboratories, 2005. – P. 179–185.
- Handbook of liquefied natural gas / S. Mokhatab, J. Mak, J. Valappil, D. Woodιο Oxford: Gulf Professional Publishing, 2014. – 589 p.
- 29. Vaudolon A. Liquefied gases: marine transportation and storage. London: Witherby, 2000. 176 p.
- 30. Colebrook C. Turbulent flow in pipes, with particular reference to the transition region between the smooth and rough pipe laws // Journal of the Institution of Civil engineers. 1939. Vol. 11. № 4. P. 133–156. DOI: 10.1680/ijoti.1939.13150.
- 31. BS EN ISO 1127:1997. Stainless steel tubes dimensions, tolerances and conventional masses per unit length. London: BSI, 1998. 10 p.

- 32. ГОСТ 9941-2022. Трубы бесшовные холоднодеформированные из коррозионно-стойких высоколегированных сталей. Технические условия. – М.: РСТ, 2023. – 20 с.
- 33. IACS Rec 142: LNG Bunkering Guidelines London: IACS, 2016. 67 p. URL: https://iacs.org.uk/resolutions/recommendations/141-160/rec-142-new (дата обращения 30.08.2023).
- 34. СП 61.13330.2012. Тепловая изоляция оборудования и трубопроводов. Актуализированная редакция СНиП 41-03-2003. М.: Минрегион России, 2012. – 51 с.
- SCF Group Проект «Ямал СПГ» (Россия). ПАО «Совкомфлот». URL: https://scfgroup.com/fleet/business\_scope/projects/item601.html (дата обращения 18.01.2024).

#### Информация об авторах

Шамиль Мансурович Муниров, аспирант кафедры оборудования нефтегазопереработки Российского государственного университета нефти и газа (национального исследовательского университета) имени И.М. Губкина, Россия, 119991, г. Москва, пр. Ленинский, 65, к. 1; shamil.munirov@gmail.com; https://orcid.org/0009-0001-6838-4317

Вячеслав Борисович Мельников, доктор химических наук, профессор кафедры оборудования нефтегазопереработки Российского государственного университета нефти и газа (национального исследовательского университета) имени И.М. Губкина, Россия, 119991, г. Москва, пр. Ленинский, 65, к. 1; v.mel@mail.ru

Поступила в редакцию: 21.06.2024 Поступила после рецензирования: 06.07.2024 Принята к публикации: 02.04.2025

#### REFERENCES

- 1. 2023 World LNG Report. London, IGU, 2023. Available at: https://www.igu.org/resources/lng2023-world-lng-report/ (accessed 18 December 2023).
- 2. Dynamics of industrial production in 2022. Moscow, Rosstat, 2023. (In Russ.) Available at: https://rosstat.gov.ru/folder/313/document/196621 (accessed 30 August 2023).
- 3. Long-term program for the development of liquefied natural gas production in the Russian Federation: Decree of the Government of the Russian Federation No. 640-r dated March 16. Moscow, The Russian Government, 2021. (In Russ.) Available at: http://static.government.ru/media/files/l6DePkb3cDKTgzxbb6sdFc2npEPAd7SE.pdf (accessed 30 August 2023).
- 4. Ilyin M.S. The method of calculating the technological parameters of a gas pipeline for liquefied natural gas. *Oil & gas terminal: Materials of Int. Sci. & Tech. Conf. Transportation and storage of hydrocarbon raw materials.* Tyumen, April 25–26, 2019. Tyumen, Tyumen Ind. Univ. Publ., 2019. pp. 74–83. (In Russ.)
- 5. Voronov V.A., Karyakina E.D., Akhmerov E.V. Analysis of technical solutions in transport and storage of liquefied natural gas. *Journal of International Academy of Refrigeration*, 2019, no. 3, pp. 15–22. (In Russ.)
- 6. Zaitsev A.V., Logvinenko E.V. Optimization of cryogenic piping using Pareto optimal solution method. *Journal of International Academy of Refrigeration*, 2015, no. 2, pp. 55–60. (In Russ.)
- 7. Voronov V. A., Martynenko Ya.V. The comparative analysis of single-phase and two-phase regimes of natural gas transportation by pipeline systems. *International Research Journal*, 2017, no. 4-4 (58), pp. 28–34. (In Russ.)
- 8. Shammazov I., Karyakina E. The LNG flow simulation in stationary conditions through a pipeline with various types of insulating coating. *Fluids*, 2023, no. 8, pp. 68. DOI: 10.3390/fluids8020068.
- Fedorova E.B. Comprehensive scientific and technological justification of the production of liquefied natural gas. Dr. Diss. Moscow, 2019. 360 p. (In Russ.) Available at: https://www.gubkin.ru/diss2/files/Dissertation\_Fedorova\_EB.pdf (accessed 30 August 2023).
- 10. VNTP 51-1-88. Departmental Norms of Production Engineering of facilities for the production and storage of liquefied natural gas, isothermal storage facilities and LNG filling stations (temporary). Moscow, Mingazprom of the USSR Publ., 1988. 39 p. (In Russ.)
- 11. Safety Manual «Recommendations for the installation and safe operation of technological pipelines». Moscow, Scientific technical center of industrial safety problems research CJSC, 2013. 194 p. (In Russ.)
- 12. GOST 32569-2013. Technological steel pipelines. Requirements for installation and operation in explosion- and fire-hazardous and chemically hazardous industries. Moscow, Standartinform Publ., 2015. 185 p. (In Russ.)
- 13. OST 26-04-1221-75. Cryogenic pipelines. General technical requirements. Moscow, NIIchimmash OJSC, 1998. 35 p. (In Russ.)
- 14. GOST R 56352-2015. Oil and gas industry. Production, storage and pumping of liquefied natural gas. General safety requirements. Moscow, Standartinform Publ., 2015. 22 p. (In Russ.)
- 15. Federal norms and rules in the field of industrial safety «Safety rules for liquefied natural gas facilities». Moscow, Rostekhnadzor Publ., 2022. 20 p. (In Russ.) Available at: https://docs.cntd.ru/document/573140265 (accessed 30 August 2023).
- 16. BS EN 1473:2007. Installation and equipment for liquefied natural gas. Design of onshore installations. London, BSI, 2007. 132 p.
- 17. NFPA 59A-2019. Standard for the production, storage, and handling of liquefied natural gas (LNG). Quincy, NFPA, 2019. 93 p.
- 18. ASME B31.3-2022. Process piping. ASME code for pressure piping, B31. New York, ASME, 2023. 546 p.
- 19. ASME B31.4-2022. Pipeline transportation systems for liquids and slurries, B31. New York, ASME, 2022. 116 p.
- 20. GOST 34894-2022. Liquefied natural gas. Technical conditions. Moscow, RST Publ., 2022. 12 p. (In Russ.)
- 21. Rumble J., Bruno T., Doa M. CRC handbook of chemistry and physics. 104<sup>th</sup> ed. Ed. by J. Rumble. Boca Raton, CRC Press, 2023. 1604 p.

- 22. Isakovich R.Ya., Loginov V.I., Popadko V.E. Automation of production processes in the oil and gas industry. Moscow, Nedra Publ., 1983. 424 p. (In Russ.)
- 23. Arkharov A.M., Arkharov I.A., Belyakov V.P., Bondarenko V.L., Mikulin E.I., Nikiforov Yu.V., Pronko V.G., Pisarev Yu.G., Savinov M.Yu., Semenov V.Yu., Smorodin A.I., Filin N.V., Shadrina V.Yu., Shevich Yu.A., Shurgalsky E.F. Cryogenic systems: Vol. 2. Fundamentals of designing devices, installations and systems. Eds. A.M. Arkharov, A.I. Smorodin. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1996. 710 p. (In Russ.)
- 24. Tugunov P.I., Novoselov V.F., Korshak A.A., Shammazov A.M. Typical calculations for the design and operation of oil depots and pipelines. Ufa, DizainPoligrafServis LLC, 2002. 658 p. (In Russ.)
- 25. Igboanusi C., Amuji H., Onukwube O., Chikadibia N. Global optimal vessel capacity for LNG production and transportation. Journal of Sustainable Development of Transport and Logistics, 2022, vol. 7, no. 1, pp. 82–89. DOI: 10.14254/jsdtl.2022.7-1.7.
- 26. Molnar G. Economics of gas transportation by pipeline and LNG. The Palgrave Handbook of International Energy Economics. Eds. M. Hafner, G. Luciani. Cham, Palgrave Macmillan, 2022. pp. 23-57. DOI: 10.1007/978-3-030-86884-0\_2.
- 27. Coyle D., Patel V. Processes and pump services in the LNG industry. Proceedings of the 22<sup>nd</sup> International Pump Users Symposium. Texas A&M University, Turbomachinery Laboratories, 2005. pp. 179–185. 28. Mokhatab S., Mak J.Y., Valappil J.V., Wood D.A. *Handbook of liquefied natural gas*. Oxford, Gulf Professional Publishing,
- 2014. 589 p.
- 29. Vaudolon A. Liquefied gases: marine transportation and storage. London, Witherby, 2000. 176 p.
- 30. Colebrook C. Turbulent flow in pipes, with particular reference to the transition region between the smooth and rough pipe laws. Journal of the Institution of Civil engineers, 1939, vol. 11, no. 4, pp. 133–156. DOI: 10.1680/ijoti.1939.13150.
- 31. BS EN ISO 1127:1992. Stainless steel tubes dimensions, tolerances and conventional masses per unit length. London, BSI, 1998. 10 p.
- 32. GOST 9941-2022 Seamless cold-formed pipes made of corrosion-resistant high-alloy steels. Technical conditions. Moscow, RST Publ., 2022. 20 p. (In Russ.)
- LNG 33. IACS Rec 142: Bunkering Guidelines. London, IACS. 2016. Available at: https://iacs.org.uk/resolutions/recommendations/141-160/rec-142-new (accessed 30 August 2023).
- 34. SP 61.13330.2012. Thermal insulation of equipment and pipelines. Updated version of SNIP 41-03-2003. Moscow, RRD Publ., 2012. 51 p. (In Russ.)
- 35. SCF Project «Yamal LNG» https://scf-Group (Russia), 2024 Available at: group.com/fleet/business\_scope/projects/item601.html (accessed 18 January 2024).

#### Information about the authors

Shamil M. Munirov, Postgraduate Student, National University of Oil and Gas «Gubkin University», 65, bld. 1, Leninsky avenue, Moscow, 119991, Russian Federation; shamil.munirov@gmail.com; https://orcid.org/0009-0001-6838-4317

Vyacheslav B. Melnikov, Dr. Sc., Professor, National University of Oil and Gas «Gubkin University», 65, bld. 1, Leninsky avenue, Moscow, 119991, Russian Federation; v.mel@mail.ru

Received: 21.06.2024 Revised: 06.07.2024 Accepted: 02.04.2025

УДК 550.37 DOI: 10.18799/24131830/2025/5/4652 Шифр специальности ВАК: 25.00.10 Научная статья

# Комплексирование электроразведочных методов при поисках рудоконтролирующих структур в условиях Турунтаевской рудной зоны (Томская область)

# А.А. Заплавнова<sup>1⊠</sup>, В.В. Оленченко<sup>1,3</sup>, Е.В. Поспеева<sup>1</sup>, П.С. Осипова<sup>1</sup>, Б.Б. Логутов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук, Россия, г. Новосибирск <sup>2</sup> Общество с ограниченной ответственностью «Инерт-Строй», Россия, г. Томск <sup>3</sup> Новосибирский государственный университет, Россия, г. Новосибирск

# <sup>™</sup>ZaplavnovaAA@ipgg.sbras.ru

Аннотация. Актуальность. Перспективы расширения минерально-сырьевой базы в настоящее время связаны с поиском месторождений «скрытого типа», не имеющих выхода на поверхность. Для таких объектов характерны большие мощности перекрывающих отложений, достигающие 100 и более метров. Проведение поисковых геофизических работ в подобных условиях является не всегда результативным из-за неправильно подобранного комплекса методов и несоблюдения стадийности исследований. Одним из возможных способов поиска таких объектов является выявление глубинной рудоконтролирующей структуры при мелкомасштабных поисках с последующей детализацией верхней части разреза крупномасштабными исследованиями. Цель. Получение новых знаний о строении Турунтаевской рудной зоны с применением комплекса электроразведочных методов, позволяющих извлекать информацию с глубин от нескольких километров до первых сотен метров. Методы. Магнитотеллурическое зондирование, зондирование становлением поля, электротомография с измерением вызванной поляризации. Результаты и выводы. По данным магнитотеллурических исследований в основании рудной зоны была выделена субвертикальная низкоомная неоднородность линзовидной формы, глубина кровли которой отмечается на 4 км. Кроме этого, на глубине от 2 до 3 км выявлен скрытый высокоомный Тельбесский магматический комплекс шириной от 10 км. Эти геоэлектрические структуры авторы используют в качестве глубинных критериев для картирования рудных зон района исследований. Метод зондирования становлением поля в условиях Турунтаевской рудной зоны может применяться для картирования положения кровли рудовмещающих палеозойских пород, но не позволяет решить основную геологическую задачу – поиск рудных объектов. По данным электротомографии с измерением вызванной поляризации прослеживаются линейные узкие зоны пониженного удельного электрического сопротивления, ассоциирующиеся с рудоконтролирующими структурами и подтверждённые бурением. Эти зоны или их контакты сопровождаются линейными аномалиями повышенной поляризуемости, которые мы связываем с сульфидной минерализацией, включающей среди прочих минералов и сфалерит. Всего выделено четыре протяженных рудоконтролирующих структуры субмеридионального простирания, и была опровергнута версия существования пологозалегающих рудных тел. На примере Турунтаевской рудной зоны показано, что электропроводящие неоднородности, выделенные методами магнитотеллурических зондирований в верхней коре и электротомографии на глубине, не превышающей первые сотни метров, на различных стадиях поисков, должны быть использованы в качестве признаков для обнаружения и локализации новых объектов на прилегающих территориях.

**Ключевые слова:** Турунтаевская рудная зона, магнитотеллурические зондирования, электротомография, зондирование становлением поля, рудная геофизика, комплексирование геофизических методов

Благодарности: Авторы благодарны коллективу лаборатории геоэлектрики Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН за помощь в проведении полевых измерений, последующей обработке и интерпретации результатов. Выражаем благодарность генеральному директору управляющей компании ООО «УК ТИСК» А.Ю. Беляеву за содействие в проведении полевых работ методом МТЗ. Исследования выполнены при частичной поддержке проекта Программы фундаментальных научных исследований (ФНИ) № FWZZ-2022-0024.

Для цитирования: Комплексирование электроразведочных методов при поисках рудоконтролирующих структур в условиях Турунтаевской рудной зоны (Томская область) / А.А. Заплавнова, В.В. Оленченко, Е.В. Поспеева, П.С. Осипова, Б.Б. Логутов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 5. – С. 62–75. DOI: 10.18799/24131830/2025/5/4652 UDC 550.37 DOI: 10.18799/24131830/2025/5/4652 Scientific paper

# Combination of electrical exploration methods in searching for ore-controlling structures in the Turuntaevskaya ore zone (Tomsk region)

# A.A. Zaplavnova<sup>1</sup>, V.V. Olenchenko<sup>1,3</sup>, E.V. Pospeeva<sup>1</sup>, P.S. Osipova<sup>1</sup>, B.B. Logutov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation

<sup>2</sup> Limited Liability Company «Inert-Stroy», Tomsk, Russian Federation <sup>3</sup> Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation

# <sup>™</sup>Zaplavnovaaa@ipgg.sbras.ru

Abstract. Relevance. The prospects of expanding the mineral resource base are currently associated with the search for "hidden type" deposits, which do not have access to the surface. Such objects are characterized by large thicknesses of overlying sediments reaching 100 and more meters. Prospecting geophysical works in such conditions is not always effective due to incorrectly selected set of methods and non-observance of research stages. One of the possible ways to search for such objects is to identify the deep ore-controlling structure in small-scale prospecting and subsequent detailing of the section upper part by large-scale studies. Aim. To obtain new information about the Turuntaevskaya ore zone structure using a set of electrical exploration methods. The set allows extracting information from depths of several kilometers to the first hundreds meters. *Methods.* Magnetotelluric sounding, transient electromagnetic sounding, electrical resistivity tomography with measurement of induced polarization. Results and conclusions. According to magnetotelluric studies data, a conducting heterogeneity of lenticular shape was identified at the base of the ore zone. The roof depth of which is noted at 4 km. The identification of a hidden intrusive body of the Telbes magmatic complex at a depth from 2 to 3 km and with a width of 10 km is also a significant result. The authors use these geoelectric structures as depth criteria for mapping ore zones in the study area. The transient electromagnetic sounding method in the conditions of Turuntaevskaya ore zone, can be used to map the position ore-bearing Paleozoic rocks top, but does not allow solving the main geological problem - the search for ore objects. According to the data of electrical resistivity tomography with measurement of induced polarization, linear narrow zones of low electric resistivity associated with ore-controlling structures and confirmed by drilling are traced. These zones or their contacts are accompanied by linear anomalies of increased polarizability, which we associate with sulphide mineralization. In total, four extended ore-controlling structures of submeridional strike were identified, and the version of the existence of hollow-lying ore bodies was refuted. On the example of Turuntaevskaya ore zone it was shown that conductive heterogeneities identified by methods of magnetotelluric sounding and electrotomography at various stages of prospecting should be used as prospecting criteria in the search for new objects in the adjacent areas.

**Keywords:** Turuntaevskaya ore zone, magnetotelluric sounding, transient electromagnetic sounding, electrical resistivity tomography with measurement of induced polarization, ore geophysics, complex of geophysical methods

**Acknowledgements:** The authors are grateful to the staff of the Geoelectrics Laboratory of Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS for assistance in field measurements, subsequent processing and interpretation. We express our gratitude to A.Yu. Belyaev, General Director of the managing company UK TISK LLC, for support in field magnetotelluric survey. The research was partially supported by the Fundamental Scientific Research Program (FSRP) project no. FWZZ-2022-0024.

**For citation:** Zaplavnova A.A., Olenchenko V.V., Pospeeva E.V., Osipova P.S., Logutov B.B. Combination of electrical exploration methods in searching for ore-controlling structures in the Turuntaevskaya ore zone (Tomsk region). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 5, pp. 62–75. DOI: 10.18799/24131830/2025/5/4652

#### Введение

Иерархия металлогенических таксонов – провинций, районов, узлов, месторождений и отдельных рудных тел – проявляется в геоэлектрических аномалиях разного масштаба – от глубинных проводящих неоднородностей в литосфере до отдельных аномалий, связанных с рудными телами в верхней части разреза. Эндогенные рудогенерирующие системы построены по единой схеме, включающей три уровня: зону генерации или глубинный источник мобильной фазы (магм или флюидов) с растворенными в ней рудными компонентами; зону консолидации, где мобильная фаза кристаллизуется (в случае магматических расплавов) или сбрасывает рудную нагрузку и рассеивается (в случае флюидных потоков); транспортную зону или дренажную сеть, выводящую мобильную фазу в верхние горизонты земной коры. В процессе формирования эндогенных месторождений решающая роль принадлежит дорудным структурам, которые определяют пути движения рудоносных растворов. Они разделяются на рудоподводящие, рудораспределяющие и рудовмещающие. Комплексирование электроразведочных методов, обеспечивающих разную глубинность и разрешающую способность, позволяет изучить как рудоподводящие, так и рудовмещающие зоны [1, 2].

Перспективы расширения минерально-сырьевой базы в настоящее время связаны с поиском не

имеющих выходов на поверхность месторождений «скрытого типа» [3]. Для таких объектов характерны большие мощности перекрывающих отложений, достигающие 100 и более метров. Проведение поисковых геофизических работ в подобных условиях является не всегда результативным из-за неправильно подобранного комплекса методов и несоблюдения стадийности исследований. Одним из возможных способов поиска таких объектов является выявление глубинной рудоконтролирующей структуры при мелкомасштабных поисках с последующей детализацией верхней части разреза крупномасштабными исследованиями.



Примером скрытого рудопроявления является Турунтаевская рудная зона, расположенная в Томском районе Томской области на стыке структур Кузнецкого Алатау и Колывань-Томской складчатой зоны. Она характеризуется блоковым строением фундамента, осложненным надвиговыми структурами и крутопадающими геологическими объектами [4, 5]. Оруденение относится к вкрапленному и прожилково-вкрапленному типам колчеданнополиметаллической формации. Рудные тела представлены в основном сфалеритом, в меньшей степени галенитом, пиритом, халькопиритом и арсенопиритом. На отдельных участках наблюдаются сгущения прожилково-вкрапленных руд до штокверков с характерными углами залегания 45-60° [6-8].

Впервые Турунтаевская рудная зона была выделена в 1964 г. при проведении геологосъемочных работ масштаба 1:50000. Зона прослежена на 12 км вдоль Яйского горста Кузнецкого Алатау при ширине 1–2 км и вскрыта скважинами на глубину до 500 м [8]. Геофизические исследования рудной зоны ограничились методами магниторазведки, вертикальных электрических зондирований с измерением вызванной поляризации (ВЭЗ-ВП), срединного градиента с измерением вызванной поляризации (СГ-ВП) и измерениями естественного электрического поля (ЕП) в 80-х гг. прошлого века, которые не дали существенных результатов [6]. Глубинные геофизические исследования ранее не проводились. Однако с появлением новой аппаратуры и программного обеспечения возможности электроразведочных методов при исследовании сложнопостроенных геологических структур значительно расшились.

Целью настоящих исследований являлось получение новой информации о строении Турунтаевской рудной зоны на базе комплексирования электроразведочных методов, позволяющих изучать геологический разрез с первых десятков метров до глубин свыше 10 км.

- Рис. 1. а) геолого-структурная схема Колывань-Томской складчатой зоны масштаба 1:100000 с изменениями по [10]; б) фрагмент Государственной геологической карты доплиоценовых образований масштаба 1:1000000 [8]: 1 – Томская подзона. Терригенные прибрежно-морские и лагунно-континентальные фации Томского прогиба; 2 – Зарубинско-Лебедянская подзона. Вулканогенные, карбонатно-терригенные прибрежно-морские фа-3 – Ташминская подзона. Карбонатно-терригенные, прибрежно-морские, терригенные лагунноконтинентальные фации Ташминского прогиба; 4 – Усманская подзона. Карбонатно-терригенные прибрежно-морские, лагунно-континентальные красноцветные фации Усманского прогиба; 5 – Нарымско-Колпашевская складчатая зона; 6 – вулканиты митрофановской свиты (D2 mt); 7 – невскрытые, предполагаемые по геофизическим данным: а) фронтальные части, б) выступы; 8 – ареолы распространения даек основного состава (Т1-2); 9 – шарьяж; 10 – надвиг; 11 – разломы главные достоверные, выходящие на картографируемую поверхность; 12 – Лагернотомская свита. Пески, алевриты, глины с прослоями и линзами бурых углей; 13 – Новомихайловская свита. Пески, глины, алевриты, прослои и линзы бурых углей; 14 – Сымская свита. Пески каолинизированные, глины и алевриты, прослойки бурого угля; 15 – Симоновская свита. Пески с прослоями песчаников и глин; 16 – Изылинский дайковый комплекс гипабиссальный. Дайки долеритов, монцонитов, монцодиоритов; 17 – Басандайская свита. Песчаники, алевролиты с прослоями глинистых сланцев пропластками каменного угля; 18 – Юргинская свита. Песчаники с прослоями глинистых и известково-глинистых сланцев; 19 – Пачинская свита. Сланцы глинистые, филлиты, прослои алевритоглинистых сланцев; 20 – Митрофановская свита. Базальты и их туф, хлорит-серицитовые сланцы, плагиориодациты, красноцветные песчаники и алевролиты, линзы известняков; 21 – Субвулканические образования. Штоки и дайкообразные тела долеритов; 22 – Расположение фрагмента карты доплиценовых образований; 23 – профиль магнитотеллурического зондирования (МТЗ)
- a) geological and structural scheme of the Kolyvan-Tomsk folded zone at a scale of 1:100000 with changes according to Fig. 1. [10]; b) fragment of the State Geological Map of Pre-Pliocene formations at a scale of 1:1000000 [8]. 1 – Tomsk subzone. Terrigenous coastal-marine and lagoonal-continental facies of the Tomsk trough; 2 – Zarubinsko-Lebedyanskaya subzone. Volcanogenic, carbonate-terrigenous coastal-marine facies; 3 – Tashminskaya subzone. Carbonateterrigenous, coastal-marine, terrigenous lagoonal-continental facies of the Tashma Trough; 4 – Usmanskaya subzone. Carbonate-terrigenous-terrigenous coastal-marine, lagoonal-continental red-colored facies of the Usman Trough; 5 – Narym-Kolpashev folded zone; 6 – volcanics of the Mitrofanov Formation (D2 mt); 7 – uncovered, inferred from geophysical data: a) frontal parts, 6 ledges; 8 - dykes areoles of basic composition (T1-2); 9 - shuffling; 10 - thrusting; 11 - main reliable faults extending to the mapped surface; 12 - Lagernotomskaya Formation. Sands, siltstones, clays with interlayers and lenses of brown coal; 13 – Novomikhailovskaya Formation. Sands, clays, siltstones, interlayers and lenses of lignite; 14 – Sym Formation. Kaolinized sands, clays and siltstones, interlayers of brown coal; 15 – Simonov Formation. Sands with interlayers of sandstones and clays; 16 – Hypabyssal Izylinsky dyke complex. Dikes of dolerites, monzonites, montsodiorites; 17 – Basandai Formation. Sandstones, siltstones with interlayers of clay shales and interlayers of coal; 18 – Yurginskaya Formation. Sandstones with interlayers of clayey and calcareous shale; 19 – Pachinskaya Formation. Clay shales, phyllites, interlayers of silty-clay shales; 20 - Mitrofanovskaya Formation. Basalts and their tuffs, chlorite-sericite shales, plagioriodacites, red-colored sandstones and siltstones, limestone lenses; 21 – Subvolcanic formations. Stokes and dyke-like bodies of dolerites; 22 – Location of a fragment of the map of pre-Plicene formations; 23 – magnetotelluric sounding (MTS)

# Характеристика объекта исследования

Турунтаевская рудная зона относится к Тамшинскому полиметаллическому рудному узлу, расположенному в зоне сочленения структур Кузнецкого Алатау и Колывань-Томской складчатой зоны (рис. 1). Колывань-Томская складчатая зона была сформирована в среднепалеозойское время и сложена в основном геодинамическими комплексами обширного задугового бассейна. Важную роль в формировании современной структуры Колывань-Томской складчатой зоны играли разломы надвиговой морфологии. Такой кинематике разломов соответствует и общая структура зоны, представленная двумя крупными дугообразными сегментами.

Особенностью описываемого района является то, что он относится к складчатому обрамлению Западно-Сибирской плиты, но при этом имеет признаки платформенной области. Так, складчатый фундамент, сложенный породами палеозоя и протерозоя, перекрывается платформенным чехлом рыхлых отложений мезозоя-кайнозоя. Причиной этому служит значительная пенепленизация этой территории к верхнемеловому времени с последующим общим с плитой эпейрогеническим опусканием [4]. Сложное и длительное геологическое развитие обусловило формирование разнообразных магматических породных ассоциаций, различающихся по возрастному положению, геодинамическим обстановкам, петрогеохимическим характеристикам и рудоносности [7-9].

Изучаемое рудное поле имеет линейную форму, обусловленную привязанностью к крутопадающим разрывным нарушениям субмеридионального (Кузнецко-Алатаусского) направления. Зона прослежена по простиранию на 12 км при ширине 1-2 км и вскрыта скважинами на глубину до 500 м. Оруденение расположено в контактовых областях кембрийских, девонских вулканогенно-осадочных образований, а также в приконтактовых областях интрузивного тела гипербазитов. Ранее, на основании результатов наземной магнитометрии, ВЭЗ-ВП и геологических изысканий, в рудной зоне выделено три участка: Центральный, Искринский, Восточный [6-9].

На Центральном участке проявление представляет собой крутопадающий линейный штокверк. Продуктивная толща включает в себя гидротермально измененные вулканиты основного-среднего состава, которые прорывают также измененные силлообразные дайковые тела микродиоритов. Интенсивный метасоматоз выражается в окварцевании, карбонатизации, серицитизации. Мощность околорудных метасоматитов составляет десятки метров. Минерализация в метасоматитах представлена рассеянной вкрапленностью сфалерита, пирита, халькопирита. Продуктивная зона имеет падение на восток-северо-восток под углами 45-60°. Мощность перекрывающих оруденение рыхлых отложений составляет 70-80 м.

На Искринском участке тремя скважинами, расположенными на одном профиле, вскрыто 7 рудных проявлений, объединяющихся в единую минерализованную зону, падающую на ВСВ под углом 45° [7–9]. Характер метасоматоза и оруденения на Искринском участке аналогичен Центральному. По простиранию рудные тела не прослежены. В скважине № 150 на этом участке сфалерит находится совместно с галенитом, что является редким случаем для зоны [5, 8].

# Методика исследования

Комплекс геофизических методов включал магнитотеллурическое зондирование (МТЗ), электромагнитное зондирование становлением поля (ЗС) и электротомографию с измерением вызванной поляризации (ЭТ-ВП).

Исследования методом МТЗ были направлены на изучение глубинного строения Турунтаевской рудной зоны. Общая протяженность профиля составила около 40 км с шагом 5 км и детализацией до 1 км на территории лицензионной площади. Общее количество измерений составило 15 МТ-пунктов (рис. 2).

Полевые измерения выполнялись аппаратурой МТЗ «Nord plus» российского производства «ООО Северо-Запад» в диапазоне периодов 0,003–10000 с. Регистрировались четыре компоненты (Ех, Еу, Нх, Ну) магнитотеллурического поля. Применялась крестообразная установка с длиной электрических диполей 100 м с ориентировкой линий на магнитный север. Средняя длительность записи составила 20 часов.

Обработка четырёхкомпонентных записей магнитотеллурического поля выполнена в программе ЕРІКІТ, реализующей современные алгоритмы спектрального анализа в режимах одиночных ("local", SS) и при необходимости синхронных зондирований с удаленной базой ("remote reference", RR). Главной особенностью при обработке полученных данных была операция приведения симметричного тензора к его главным осям. Известно [11], что при вращении тензора импеданса |Z| в одном пункте зондирования можно получить множество амплитудных и фазовых кривых  $\rho_{xy}$ ,  $\rho_{yx}$  и  $\varphi_{xy}$ ,  $\varphi_{yx}$ . Конфигурация кривых существенно зависит от их ориентации, и они могут противоречить друг другу. Поэтому после первичной обработки полевых данных на каждом пункте зондирования был выполнен анализ амплитудных диаграмм тензора импеданса и определен угол α, характеризующий его главные направления. После чего вновь проводилась обработка данных с поворотом системы координат на этот угол. Количественная интерпретация кривых МТЗ выполнялась методом подбора с использованием программного комплекса WinGLink и электронных палеток.



Puc. 2. Схема полевых исследований: 1 – пункты МТЗ и их номер; 2 – положение участка работ ЭТ-ВП; 3 – профили ЭТ-ВП и их номер; 4 – положение скважин; 5 – генераторные петли метода зондирования становления поля
 Fig. 2. Scheme of field works: 1 – MTS and their number; 2 – location of ERT-IP work area; 3 – electrical resistivity tomography with measurement of induced polarization (ERT-IP) profiles and their numbers; 5 – transient electromagnetic sounding (TES) generator loops

Методом 3С проводились площадные исследования от четырёх генераторных петель размером 200 на 200 м с 9 пикетами внутри каждой генераторной петли с равномерным шагом. Всего было проведено 36 измерений. Профиль 3С располагался вдоль буровой линии (б.л.) № 5.5, совпадающей с профилем 1 ЭТ-ВП (рис. 2). Центр второй петли находится на расстояния менее 50 м к югу от пункта МТЗ 6 (рис. 2). Измерения выполнялись аппаратурой «Fast Snap» (ООО «Сигма-Гео»). Предварительная обработка осуществлялась в программном комплексе «Tem-Processing», поставляемом с аппаратурой. Локальной задачей являлась оценка информативности метода 3С при поисках рудных зон в пределах Турунтаевской рудной зоны.

Зондирования методом ЭТ-ВП проведены на участке Центральный по 6 профилям с целью определения простирания рудной зоны, вскрытой буровой скважиной на б.л. № 5.5. Участок работ располагался между МТ-пунктами 6–8 (рис. 2). Расстояние между профилями ЭТ-ВП составило 200 м. Зондирования выполнялись трехэлектродной прямой и встречной установками. Межэлектродное расстояние равнялось 15 м. Измерения выполнены с помощью современной многоканальной аппаратуры «Скала 48-к12» производства ООО «Конструкторское бюро электрометрии» (г. Новосибирск). Обработка измеренных данных производилась в специализированном программном комплексе Xeris, которое поставляется в комплекте с измерительной аппаратурой. Решение обратных задач (инверсия) в рамках двумерных и трёхмерных поляризующихся моделей выполнялась с помощью программ Res2Dinv32 версии 3.56.22 и Res3Dinvx64 версии 3.14.20.

Вызванная поляризация оценивалась по параметру заряжаемости (*m*) в диапазоне 20–100 мс, который представляет собой отношение интеграла напряжения, измеренному в интервале времени после выключения импульса тока к напряжению, измеренному в конце импульса напряжения после выключения импульса тока (1):

$$m = \frac{1}{U_{\Pi P}(t_1 - t_2)} \int_{t_2}^{t_1} U_{B\Pi}(t) dt , \qquad (1)$$

где  $U_{B\Pi}(t)$  – напряжение, измеренное в интервале времени  $(t_1, t_2)$  после выключения импульса тока;  $U_{\Pi P}(t)$  – напряжение, измеренное в конце импульса тока [12].

### Результаты

## Магнитотеллурические зондирования

Профиль МТЗ длиной 40 км с юго-запада на северо-восток пересекает ряд крупных геологических структур: Омутинскую горст-антиклиналь, Ташминский грабен-синклиналь, Яйский горст, Усманскую синклиналь. На геоэлектрическом разрезе мезо-кайнозойский осадочный чехол, представленный песчано-глинистыми отложениями, выделяется слоем с низкими значениями удельного электрического сопротивления (УЭС) – 10–30 Ом·м. Толщина слоя возрастает с юго-запада на северовосток с 50 до 100 м (рис. 3).

Под осадочными отложениями Омутинской антиклинали и Усманской синклинали залегают мощные комплексы девонских вулканических пород, представленных андезитами, хлоритсерицитовыми сланцами лавами, туфами, базальтами и туфопесчаниками с прослоями известняков со значениями УЭС 350–400 Ом·м.

Ташминская грабен-синклиналь располагается между Томским шарьяжем и Кузнецко-Алатаусским разломом. Томский шарьяж имеет сложное строение и при этом слабо проявляется в геоэлектрическом разрезе. Висячее крыло представлено эффузивными породами девонского возраста, залегающими на додевонском кристаллическом фундаменте. Геоэлектрический разрез грабен-синклинали характеризуется трехслойным строением: верхний слой представлен проводящим чехлом (10-30 Ом м); второй – известняками, песчаниками, алевролитами и мергелями предположительно девонско-каменноугольного возраста (200 Ом м); третий относится к Тельбесскому моноцит-гранитовому плутоническому комплексу. Третий горизонт представляет особый интерес. Его кровля картируется на глубинах 2-3 км, а значения УЭС достигают 850-950 Ом м (рис. 3). По мнению авторов, этот слой относится к Тельбесскому моноцит-гранитовому плутоническому комплексу (D<sub>1</sub>). Согласно литературным данным, здесь предполагается существование скрытого интрузивного массива [5], в том числе Тельбесского комплекса [8, 13], как участника многостадийного процесса рудообразования. Тельбесский массив простирается более чем на 100 км параллельно борту Кузнецкого прогиба при средней ширине 10 км и имеет многочисленные апофизы. В.Л. Хомичев [13] отмечает его связь с глубинным разломом, многостадийность внедрения и разнообразный состав.



Рис. 3. Разрез УЭС по результатам МТЗ с элементами интерпретации: 1 – гранитоидный комплекс; 2 – додевонские (каледонские) структурные комплексы; 3 – известняки, песчаники, алевролиты; 4 – субвулканические образования: шток и дайкообразные тела; 5 – лавы, туфы, базальты, туфопесчаники; 6 – андезиты, базальты, туфы; 7 – зона флюидно-магматической переработки с повышенной трещиноватостью пород; 8 – хлорит-серицитовые сланцы; 9 – оси смещения основных разломов; 1 – Томский шарьяж; II – Кузнецко-Алатаусский разлом

Fig. 3. ER section based on MTS results with interpretation elements: 1 – granitoid complex; 2 – Devonian (Caledonian) structural complexes; 3 – limestones, sandstones, siltstones; 4 – subvolcanic formations: stock and dyke-like bodies; 5 – lavas, tuffs, basalts, tuff sandstones; 6 – andesites, basalts, tuffs; 7 – zone of fluid-magmatic processing, with increased fracturing of rocks; 8 – chlorite-sericite schists; 9 – axes of displacement of the main faults; 1 – Tomsk shuffle; II – Kuznetsk-Alatau fault

Более сложное геоэлектрическое строение у Яйского горста. Песчано-глинистый слой перекрывает палеозойский рудовмещающий комплекс, включающий систему разломов, толщи известняков с прослоями алевролитов и песчаников (200–250 Омм), Митрофановский комплекс субвулканических образований ( $D_2$ ): штоков и дайкообразных тел (350 Омм) и вулканических пород ( $C-D_2$ ) – андезиты, хлорит-серицитовые сланцы, базальты, туфы (300 Омм). Ниже по разрезу выделяется слой известняков с прослоями черных сланцев вендского возраста (250 Омм). Под ним фиксируются высокие значения УЭС (от 500 Омм), характерные для пород кристаллического протерозойского фундамента.

Области повышенной трещиноватости пород проявляются на разрезе в виде субвертикальных зон с пониженными значениями УЭС (до 150–170 Ом<sup>м</sup>) (п.п. 5, 10, 13, 15). В районе пунктов 6–9 (рис. 3) выделяется проводящая неоднородность с глубиной залегания верхней кромки 4 км и сопротивлением, изменяющимся от 70–50 до 30 Ом<sup>•</sup>м. Аномалия имеет вытянутую линзовидную форму и погружается в северо-восточном направлении на глубину более 14 км. Аномалия может являться рудоподводящей структурой, по которой поступали рудоносные расплавы (или растворы) в верхние горизонты разреза земной коры.

#### Зондирование становлением поля

На геоэлектрическом разрезе, полученном по данным ЗС, контрастно выделяется граница мезо-

кайнозойских осадочных пород и высокоомного палеозойского основания (рис. 4). Первые характеризуются значениями УЭС 10–30 Ом·м, вторые – более 400 Ом·м. Тем не менее на разрезе практически не проявляется рудная зона, установленная бурением в интервале 625–800 м. Отмечается лишь незначительное понижение сопротивления до 440 Ом·м на фоне 530 Ом·м.

Эти результаты показали, что в геологических условиях Турунтаевской рудной зоны метод ЗС не является информативным при изучении рудных объектов, а может применяться только для структурных построений. Причиной низкой информативности метода предположительно являются сложные геологические условия района: крутопадающий характер залегания, слабая контрастность в УЭС и малая мощность рудовмещающих тел.

#### Электротомография

На разрезе УЭС по данным ЭТ-ВП (рис. 5) перекрывающая толща песчано-глинистых отложений выделяется слоем низкого УЭС до абсолютных отметок 0–50 м (глубина 70–120 м). При этом в низкоомном слое глин отчетливо выделяются слои аллювиальных песков повышенного УЭС. Ниже по разрезу залегает рудовмещающий высокоомный комплекс вулканических палеозойских пород. УЭС рудовмещающей толщи составляет 1000–3000 Ом·м, а в разломных зонах – 150–750 Ом·м.



**Рис. 4.** Разрез УЭС по результатам зондирования становлением поля (3С) с элементами интерпретации: 1 – песок; 2 – глина; 3 – плагиоклазовые порфириты; 4 – туфопесчаники и туфогравелиты; 5 – хлорит-серицитовые метасоматиты; 6 – кварц-карбонатные метасоматиты переходной зоны; 7 – разломы; 8 – положение скважины





Рис. 5. Разрез УЭС профиля № 1 вдоль буровой линии (а), поляризуемости (б) с элементами интерпретации по результатам 2D-инверсии: 1 – песок; 2 – глина; 3 – плагиоклазовые порфириты; 4 – туфопесчаники и туфогравелиты; 5 – хлорит-серицитовые метасоматиты; 6 – кварц-карбонатные метасоматиты переходной зоны; 7 – разломы

**Fig. 5.** ER section of profile no. 1 along the drilling line (a), polarizability (b) with interpretation elements, based on the results of 2D inversion: 1 – sand; 2 – clay; 3 – plagioclase porphyrites; 4 – tuffaceous sandstone and tuff gritstone; 5 – chlorite-sericite metasomatites; 6 – quartz-carbonate metasomatites of the transition zone; 7 – faults

Сопоставление геоэлектрического разреза по результатам 2D-инверсии с геологическим разрезом вдоль буровой линии 5.5 (рис. 5, *a*) показало, что субвертикальные зоны пониженных значений УЭС, выделенные в палеозойском фундаменте, пространственно совпадают с рудоконтролирующими зонами дробления, установленными по данным бурения. Вскрытая скважинами зона дробления, контролирующая Центральный участок, однозначно выделяется в палеозойском цоколе аномалией пониженного УЭС в интервале профиля 540–720 м. На северо-восточном фланге разреза в палеозойском цоколе прослеживается аномалия пониженного УЭС, пространственно связанная с известным Восточным участком.

Между Центральным и Восточным участком на разрезе УЭС в интервале профиля 1200–1320 в рудовмещающей толще выделяется ещё одна зона пониженного сопротивления, перспективная на оруденение. Надо заметить, что поисковые скважины, пробуренные до геофизических исследований (к сожалению, это очень часто бывает на практике), не подсекли эту зону из-за разряженной буровой сети.

Поисковый интерес представляют аномалии вызванной поляризации (более 10 мВ/В) вертикальной формы в нижних частях разреза на уровне палеозойских пород (рис. 5). Поскольку в пределах Турунтаевской площади содержание сульфидов в рудных зонах крайне мало, интерес представляет любое превышение значений *m* над нулевым фоном. Некоторые интенсивные аномалии ВП коррелируют с низкоомными аномалиями УЭС в эффузивах, которые ранее интерпретированы как разломные зоны. Аномалии высокой поляризуемости присутствуют и в восточной части профилей. Они тоже пространственно совпадают с зоной пониженных УЭС.

Анализ трёхмерной модели распределения УЭС показал (рис. 6), что в пределах площади исследований на уровне палеозойского фундамента развиты субмеридиональные узкие зоны пониженного сопротивления, интерпретируемые как рудоконтролирующие ослабленные зоны. Участки слабонарушенных вмещающих пород выделяются как области высокого УЭС.

В трёхмерной модели поляризуемости палеозойских пород выделяются линейные зоны повышенных значений m от 7 мВ/В и более на нулевом фоне (рис. 6,  $\delta$ ). Несмотря на относительно малую интенсивность аномалий ВП (в пересчете на % получим от 0,7 до 5 %, в редких случаях до 20 %), эти зоны уверенно выделяются и совпадают с известными рудопроявлениями на Центральном и Восточном участках. Таким образом, на площади исследований, кроме известных рудных зон, по данным ЭТ-ВП выделены перспективные линейные аномалии поляризуемости на западном и восточном флангах участка и в центральной части на севере.



**Рис. 6.** Распределение УЭС (а) и поляризуемости (б) на уровне рудовмещающей толщи по результатам 3D-инверсии; цифрами отмечены участки: 1 – Центральный, 2 – Восточный; 3 – скважины

*Fig. 6.* ER distribution (a) and polarizability (b) at the level of ore-bearing strata based on the results of 3D inversion; the figures indicate the following areas: 1 – Central, 2 – Eastern; 3 –drilling locations

## Обсуждение

Формирование месторождений полезных ископаемых происходит в результате концентрации полезных элементов или веществ под воздействием эндогенных, экзогенных или метаморфических процессов. Рудные узлы пространственно связаны с глубинными разломами на участках активного разуплотнения пород под влиянием тектонических деформаций, гидротермального метасоматоза и длительного воздействия нагретых мантийно-коровых флюидных потоков. Проявления таких процессов в геоэлектрических разрезах и связь месторождений с глубинными разломами отмечаются как российскими авторами, так и авторами по всему миру, например, [1, 2, 14–23] и многими другими. Поисковым критерием для выделения рудоконтролирующих структур являются низкоомные субвертикальные или линзовидные аномалии низкого сопротивления в верхней части земной коры. Участки, где разрывные нарушения различной ориентировки пересечены вертикальными разломами, являются наиболее проницаемыми для гидротермальных растворов и обладают хорошей электрической проводимостью.

Локальная проводящая аномалия УЭС, выделенная по данным МТЗ в зоне сочленения крупных геологических структур вблизи высокоомного интрузивного тела (рис. 3), означает, что рассматриваемый участок представляет собой не только тектоническую зону, но и канал, осуществляющий связь между различными глубинными уровнями, откуда поступали рудоносные растворы. Выделенная зона располагается над участком Центральный Турунтаевской рудной зоны, что подтверждает применимость поискового критерия для выделения рудоконтролирующих структур района по данным МТЗ.

Отдельно стоит отметить зону пониженных значений УЭС на МТ-пункте № 13 (рис. 3). Однако изза того, что неоднородность выделена только на одном пункте измерений, нельзя с уверенностью утверждать, что эта аномалия является признаком рудоконтролирующей структуры. Понижение УЭС может быть связано с зоной повышенной трещиноватости пород непосредственно в МТ-пункте № 13, а может быть признаком расположенной в стороне сильно проводящей глубинной структуры. Для определения природы аномалии в верхней части земной коры необходимо проследить аномальную зону не менее чем на трех пунктах зондирований.

В пользу перспективности отмеченной зоны в МТ-пункте № 13 свидетельствует то, что оперяющие разломы Кузнецко-Алатаусской шовной зоны часто формируют структуры, выполняющие роль литологических или структурных ловушек, способствующих локализации месторождений [24, 25]. Вместе с этим по геологическим и геохимическим данным отмечается более широкое распространение золотополиметаллической формации [7, 8, 26], закономерности размещения которой ещё предстоит изучить.

Результаты электротомографии показали, что рудоконтролирующие структуры уверенно выделяются на разрезах субвертикальными зонами пониженного сопротивления и повышенной поляризуемости, а в плане – узкими линейными аномалиями этих электрических параметров.

Следует отметить, что ранее, по результатам бурения, прогнозировались рудные тела, залегающие под углом около 45°. Однако анализ разреза поляризуемости (рис. 5,  $\delta$ ) показал, что на Восточном участке на пикетах 1560 и 1740 скважины вскрыли два соседних крутопадающих рудных тела. А поскольку расстояние между скважинами составляло 180 м, корреляция рудных подсечений показала относительно пологое залегание предполагаемого рудного тела, хотя на самом деле это оказалось не так.

Площадные исследования методом ЭТ-ВП позволили не только проследить простирание известных рудных зон на Центральном и Восточном участках, но и выявить аномалии от ранее неизвестных потенциально рудоносных структур, которые будут заверены бурением.

## Заключение

В результате исследований Турунтаевской рудной зоны с применением разноглубинных электроразведочных методов установлено следующее. По данным магнитотеллурических исследований в основании рудной зоны была выделена проводящая неоднородность с УЭС 50–70 Ом м и локальным понижением до 30 Ом м. Кровля структуры залегает на глубине около 4 км, а вертикальная мощность превышает 10 км. Аномалия имеет вытянутую линзовидную форму с общим погружением в северо-восточную часть разреза. Эта электрическая аномалия ассоциируется с зоной эндогенных каналов флюидно-магматической переработки пород и является геоэлектрическим индикатором рудоконтролирующей структуры.

Выявление по данным МТЗ скрытого интрузивного тела Тельбесского магматического комплекса на глубине от 2 до 3 км при ширине от 10 км является значимым результатом, так как интрузивный магматизм играет немаловажную роль в процессах формирования рудных месторождений и служит дополнительным фактором при локализации положения рудных зон.

В северо-восточной части профиля выделена менее контрастная проводящая неоднородность (150 Ом·м на фоне 350–450 Ом·м). В данной области рекомендуется детализация измерений со сгущением шага МТЗ до 1 км. Для прогнозирования новой рудной зоны необходимо выделить проводящую структуру не менее чем на трех пунктах зондирований.

Стоит отметить, что метод МТЗ не предназначен для выявления отдельных месторождений. Однако позволяет значительно уменьшить площадь поисков за счёт локализации рудоконтролирующих структур в границах рудных зон, узлов или полей. По результатам исследований методом МТЗ рекомендуется последующая детализация строения перспективных зон другими электроразведочными методами до глубины в первые сотни метров.

Метод ЗСБ в условиях Турунтаевской рудной зоны может применяться для картирования положения кровли рудовмещающих палеозойских пород, но не позволяет решить основную геологическую задачу – поиск рудных объектов.

Для детализации перспективных зон, выделенных по данным МТЗ, рекомендуется использовать метод электротомографии с измерением вызванной поляризации. По данным ЭТ-ВП прослеживаются линейные узкие зоны пониженного УЭС, ассоциирующиеся с рудоконтролирующими структурами и подтверждённые бурением. Эти зоны или их контакты сопровождаются линейными аномалиями повышенной поляризуемости, которые мы связываем с сульфидной минерализацией (пиритом, халькопиритом, галенитом). Всего выделено четыре протяженных рудоконтролирующих структуры субмеридионального простирания.

Метод ЭТ-ВП дал возможность уточнить положение рудоконтролирующих структур в пределах участ-
ков Центральный и Восточный и опровергнуть версию существования пологозалегающих 45° рудных тел.

На примере Турунтаевской рудной зоны показано, что проводящие неоднородности, выделенные методами МТЗ и ЭТ-ВП на различных стадиях поисков должны быть использованы в качестве поисковых критериев при поисках новых объектов на прилегающих территориях. Такой подход позволяет оптимизировать объёмы поискового бурения.

Комплексирование разноглубинных методов геоэлектрики показало хорошие перспективы тако-

го подхода для поисков рудных месторождений в условиях Колывань-Томской складчатой зоны, где рудовмещающая толща перекрыта мощным чехлом рыхлых отложений.

Полученные результаты подчеркивают необходимость изучения глубинного геоэлектрического строения рудных районов. Понимание строения и процессов формирования рудных зон, узлов или полей позволит выделить новые закономерности размещения полезных ископаемых, повысит эффективность их поисков и разведки.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Куликов В.А., Каминский А.Е., Яковлев А.Г. Совместная инверсия данных электротомографии и магнитотеллурических зондирований при решении рудных задач // Геофизические исследования. 2017. Т. 18. № 3. С. 27–44. DOI: 10.21455/gr2017.3-3
- Fu J., Jia S., Wang E. Combined magnetic, transient electromagnetic, and magnetotelluric methods to detect a BIF-type concealed iron ore body: a case study in gongchangling iron ore concentration area, southern liaoning province, China // Minerals. 2020. Vol. 10. № 12. P. 1044. DOI: 10.3390/min10121044
- 3. Распоряжение Правительства РФ от 22 декабря 2018 г. № 2914-р О стратегии развития минерально-сырьевой базы РФ до 2035 г. URL: http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201812280093 (дата обращения 10.04.2024).
- Геологическое строение области сопряжения Кузнецкого Алатау и Колывань-Томской складчатой зоны / В.А. Врублевский, М.П. Нагорский, А.Ф. Рубцов, Ю.Ю. Эрвье. – Томск: Изд-во Томского университета, 1987. – 96 с.
- Новый тип полиметаллической минерализации в Томской области / Б.М. Тюлюпо, А.Ф. Рубцов, Е.Я. Горюхин, В.А. Врублевский // Новые данные по геологии и полезным ископаемым Западной Сибири. – Томск: ТГУ, 1979. – № 14. – С. 37–41.
- 6. Глазырин А.Я., Филатов В.В. Отчет геофизической партии по поискам полиметаллических руд в пределах Турунтаевской зоны полиметаллической минерализации. Томск: Томская ГРЭ, ПГО «Томскнефтегазгеология», 1983. 35 с.
- Сорокин Е.И. Геолого-структурная позиция, вещественный состав руд Турунтаевского рудного узла (Томская область) и проект оценочных работ. – Томск ТПУ, 2019. – 159 с.
- Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1000000 (третье поколение). Серия Западно-Сибирская. Лист О-45-Томск. Объяснительная записка / Я.Э. Файбусович, Л.И. Зылева, В.Е. Козырев, В.Н. Воронов, А.С. Воронин, Л.И. Рубин, О.С. Калашникова, К.В. Коркунов, Д.П. Куликов, Л.Е. Пестова, В.З. Фукс, А.Н. Макарова, Е.В. Монтонен, Л.П. Новикова. – СПб: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2021. – 200 с.
- Геодинамика, магматизм и металлогения Колывань-Томской складчатой зоны / В.И. Сотников, Г.С. Федосеев, Л.В. Кунгурцев, А.С. Борисенко, А.А. Оболенский, И.П. Васильев, В.О. Гимон. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, НИЦ ОИГГМ, 1999. – 227 с.
- 10. Государственная геологическая карта Российской Федерации М 1:200000. 2-е изд. Серия Кузбасская Лист 0-45-XXXII (Тайга). Объяснительная записка / Н.Ю. Ахмадщин, О.А. Дубинскайте, О.П. Капишникова, А.С. Скогорева, А.Ф. Рубцов, Ю.В. Уткин, Т.И. Черникова, Е.И. Черняева, Е.В. Черняев, А.Ф. Шамахов, В.А. Домаренко, Е.П. Янкович. – СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2008. – 207 с.
- 11. Berdichevsky M.N., Dmitriev V.I. Models and methods of magnetotellurics. Berlin: Springer Science & Business Media, 2008. 564 c. DOI: 10.1007/978-3-540-77814-1
- 12. Loke M.H. Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys. 2022. 237 p. URL: www.geotomosoft.com (дата обращения 10.04.2024).
- 13. Глубинная модель габбро-монцодиорит-сиеногранитовой формации / В.Л. Хомичев, С.С. Долгушин, О.Г. Садур, В.В. Марков. Новосибирск: Изд-во СНИИГГиМС, 2004. 109 с.
- 14. Петрова А.А., Копытенко Ю.А. Флюидные системы Мамско-Бодайбинской минерагенической зоны северного Забайкалья // Вестник КРАУНЦ. Серия: Науки о Земле. 2019. № 1. С. 37–53. DOI: 10.31431/1816-5524-2019-2-42-25-41
- 15. Поспеева Е.В. Природа глубинной электропроводности и связь коровых аномалий с месторождениями полезных ископаемых // VIII Всероссийская школа-семинар по электромагнитным зондированиям Земли имени М.Н. Бердичевского и Л.Л. Ваньяна (ЭМЗ-2021). М., 4–9 октября 2021. С. 1–6.
- 16. Investigating the whole-lithosphere structure of a mineral system pathways and source of ore-forming fluids imaged with magnetotelluric modeling // M.J. Comeau, M. Becken, A.V. Kuvshinov, S. Demberel, E. Batmagnai, S. Tserendug // DEEP International Symposium on Deep Earth Exploration and Practices Extended abstract. Nanjing, China, October 26–31, 2021. 3 c.
- Ore-controlling structures of the Xiangshan volcanic basin, SE China: revealed from three-dimensional inversion of Magnetotelluric data / J. Deng, H. Yu, H. Chen, Z. Du, H Yang., H. Li, F. Guo // Ore Geology Reviews. – 2020. – Vol. 127. – P. 103807. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2020.103807
- 18. Application of multiscale magnetotelluric data to mineral exploration: an example from the east Tennant region, Northern Australia / W. Jiang, J. Duan, M. Doublier, A. Clark, A. Schofield, R.C. Brodie, J. Goodwin // Geophysical Journal International. – 2022. – Vol. 229. – № 3. – P. 1628–1645. DOI: 10.1093/gji/ggac029
- 19. Kurtz R.D., Ostrowski J.A., Niblett E.R. A magnetotelluric survey over the East Bull Lake gabbro-anorthosite complex // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 1986. Vol. 91. № B7. P. 7403–7416. DOI: 10.1029/JB091iB07p07403
- 20. Application of audio-magnetotelluric method for exploration the concealed ore-bodies in Yuele lead-zinc ore field, Daguan County, NE Yunnan Province, China / T.T. Lap, C. Xue, A. Wei, L. Liu, W. Li, Q. Hu, T. Zhang et al. // Journal of Geoscience and Environment Protection. 2014. Vol. 2. № 03. P. 35. DOI: 10.4236/gep.2014.23005

- 21. Crustal structures of the Qimantagh Metallogenic Belt in the northern Tibetan Plateau from magnetotelluric data and their correlation to the distribution of mineral deposits / L. He, Q. Di, Z. Wang, J. Lai, G. Xue, W. Guo // Minerals. 2023. Vol. 13. № 2. P. 225. DOI: 10.3390/min13020225
- 22. The electrical conductivity of the Andean crust in northern Chile and southern Bolivia as inferred from magnetotelluric measurements / G. Schwarz, V. Haak, E. Martinez, J. Bannister // Journal of Geophysics. 1984. Vol. 55. № 1. C. 169–178.
- Three-dimensional electrical resistivity of the north-central USA from Earth Scope long period magnetotelluric data / B. Yang, G.D. Egbert, A. Kelbert, N.M. Meqbel // Earth and Planetary Science Letters. – 2015. – Vol. 422. – P. 87–93. DOI: 10.1016/j.epsl.2015.04.006
- 24. Алабин Л.В. Структурно-формационная и металлогеническая зональность Кузнецкого Алатау. Новосибирск: Изд-во «Наука» Сибирское отделение, 1983. 113 с.
- 25. Черных А.И. Геолого-минерагеническое картирование на золото масштаба 1:500000 Северо-западной части Алтае-Саянской складчатой области (задачи, методика, результаты) // Известия Томского политехнического университета. – 2009. – Т. 314. – № 1. – С. 16–22.
- 26. Иванова Г.М., Ильенок С.С. Эндогенная золоторудная минерализация юга Томской области // Известия Томского политехнического университета. 1970. Т. 239. С. 318–321.

#### Информация об авторах

**Анна Алексеевна Заплавнова**, младший научный сотрудник Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук, Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3; ZaplavnovaAA@ipgg.sbras.ru; https: .orcid.org/0000-0002-0775-3908

Владимир Владимирович Оленченко, кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры геофизики Новосибирского государственного университета, Россия, 630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 1; ведущий научный сотрудник Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук, Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3; OlenchenkoVV@ipgg.sbras.ru; https://orcid.org/0000-0002-4386-7064

**Елена Валентиновна Поспеева**, доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук, Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3; PospeevaEV@ipgg.sbras.ru; https://orcid.org/0000-0002-5714-5652

**Полина Сергеевна Осипова**, младший научный сотрудник Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук, Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3; Osipovaps@ipgg.sbras.ru; https://orcid.org/0000-0003-0510-6333

**Борис Борисович Логутов**, главный геолог ООО «Инерт-Строй», Россия, 634061, г. Томск, пер. Нечевский, 20А. perm193xp@gmail.com

Поступила в редакцию: 15.04.2024

Поступила после рецензирования: 19.06.2024 Принята к публикации: 02.04.2025

#### REFERENCES

- 1. Kulikov V.A., Kaminsky A.E., Yakovlev A.G. Joint inversion of electrotomography and magnetotelluric sounding data in solving ore problems. *Geophysical Research*, 2017, vol. 18, no. 3, pp. 27–44. DOI: 10.21455/gr2017.3-3. (In Russ.)
- 2. Fu J., Jia S., Wang E. Combined magnetic, transient electromagnetic, and magnetotelluric methods to detect a BIF-type concealed iron ore body: a case study in gongchangling iron ore concentration area, southern liaoning province, China. *Minerals*, 2020, vol. 10, no. 12, pp. 1044. DOI: 10.3390/min10121044
- 3. Order of the Government of the Russian Federation of December 22, 2018, No. 2914-r on the strategy for the development of the mineral resource base of the Russian Federation until 2035. (In Russ.) Available at: http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201812280093 (accessed 10 April 2024).
- 4. Vrublevsky V.A., Nagorskii M.P., Rubtsov A.F., Ervier Yu. *Geological structure of the Kuznetsk Alatau and Kolyvan-Tom folded zone conjugation area.* Tomsk, Tomsk University Press, 1987. 96 p. (In Russ.)
- 5. Tyulupo B.M., Rubtsov A.F., Goryukhin E.Ya. A new type of polymetallic mineralization in the Tomsk region. *New data on geology and minerals of Western Siberia*. Tomsk, TSU Publ., 1979. No. 14, pp. 37–41. (In Russ.)
- 6. Glazyrin A.Ya., Filatov V.V. Report of geophysical party on search of polymetallic ores within Turuntaevskaya zone of polymetallic mineralization. Tomsk, Tomskaya GRE, PGO «Tomskneftegazogeologiya» Publ., 1983. 35 p. (In Russ.)
- 7. Sorokin E.I. Geological and structural position, material composition of ores of Turuntaevskoye ore nodule (Tomsk region) and project of evaluation works. Tomsk, TSU Publ., 2019. 159 p. (In Russ.)
- Faibusovich Y.E., Zyleva L.I., Kozyrev V.E., Voronov V.N., Voronin A.S., Rubin L.I., Kalashnikova O.S., Korkunov K.V., Kulikov D.P., Pestova L.E., Fuchs V.Z., Makarova A.N., Montonen E.V., Novikova L.P. State geologic map of the Russian Federation. Scale 1:1 000 000 (third generation). West Siberian Series. Sheet O-45-Tomsk. Explanatory note. St Petersburg, Cartographic Factory VSEGEI Publ., 2021. 200 p. (In Russ.)
- 9. Sotnikov V.I., Fedoseev G.S., Kungurtsev L.V., Borisenko A.S., Obolensky A.A., Vasiliev I.P., Gimon V.O. *Geodynamics, magmatism and metallogeny of the Kolyvan-Tom folded zone*. Novosibirsk, SB RAS, SIC UIGGM Publ., 1999. 227 p. (In Russ.)
- 10. Akhmadshchin N.Yu., Dubinskaite O.A., Kapishnikova O.P., Skogoreva A.S., Rubtsov A.F., Utkin Y.V., Chernikova T.I., Chernyaeva E.I., Chernyaeve E.V., Shamakhov A.F., Domarenko V.A., Yankovich E.P. *State geological map of the Russian*

Federation M 1: 200000. 2nd ed. Series Kuzbass Sheet 0-45-XXXII (Taiga). Explanatory note. St Petersburg, Cartographic Factory VSEGEI Publ., 2008. 207 p. (In Russ.)

- Berdichevsky M.N., Dmitriev V.I. Models and methods of magnetotellurics. Berlin, Springer Science & Business Media, 2008. 564 c. DOI: 10.1007/978-3-540-77814-1
- 12. Loke M.H. *Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys.* 2022. 237 p. Available at: www.geotomosoft.com (accessed 10 April 2024).
- 13. Khomichev V.L., Dolgushin S.S., Sadur O.G., Markov V.V. Depth model of the gabbro-montsodiorite-syenogranite formation. Novosibirsk, SSIIGGaMR Publ., 2004. 109 p. (In Russ.)
- 14. Petrova A.A., Kopytenko Yu.A. Fluid systems of the Mamsko-Bodaibinskaya mineralogenic zone of the northern Transbaikalia. *Vestnik KRAUNTS. Series: Earth Sciences*, 2019, no. 1, pp. 37–53. (In Russ.) DOI: 10.31431/1816-5524-2019-2-42-25-41.
- 15. Pospeeva E.V. Nature of deep electrical conductivity and connection of crustal anomalies with mineral deposits. *VIII All-Russian* school-seminar on electromagnetic soundings of the Earth named after M.N. Berdichevsky and L.L. Vanyan (EMZ-2021). Moscow, October 4–9, 2021. pp. 1–6. (In Russ.)
- 16. Comeau M.J., Becken M., Kuvshinov A.V., Demberel S., Batmagnai E., Tserendug S. Investigating the whole-lithosphere structure of a mineral system pathways and source of ore-forming fluids imaged with magnetotelluric modeling. *DEEP International Symposium on Deep Earth Exploration and Practices. Extended abstract.* Nanjing, China, 2021. 3 p.
- 17. Deng J.H., Chen H., Du Z., Yang H., Li H., Guo F. Ore-controlling structures of the Xiangshan volcanic Basin, SE China: revealed from three-dimensional inversion of Magnetotelluric data. *Ore Geology Reviews*, 2020, vol. 127, 103807 p. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2020.103807
- Jiang W., Duan J., Doublier M., Clark A., Schofield A., Brodie R.C., Goodwin J. Application of multiscale magnetotelluric data to mineral exploration: an example from the east Tennant region, Northern Australia. *Geophysical Journal International*, 2022, vol. 229, no. 3, pp. 1628–1645. DOI: 10.1093/gji/ggac029
- 19. Kurtz R.D., Ostrowski J.A., Niblett E.R. A magnetotelluric survey over the East Bull Lake gabbro-anorthosite complex. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1986, vol. 91, no. B7, pp. 7403–7416. DOI: 10.1029/JB091iB07p07403
- 20. Lap T.T., Xue C., Wei A., Liu L., Li W., Hu Q., Zhang T. Application of audio-magnetotelluric method for exploration the concealed ore-bodies in Yuele lead-zinc ore feild, Daguan County, NE Yunnan Province, China. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 2014, vol. 2, no. 03, 35 p. DOI: 10.4236/gep.2014.23005
- 21. He L., Di Q., Wang Z., Lai J., Xue G., Guo W. Crustal structures of the Qimantagh Metallogenic Belt in the northern Tibetan Plateau from magnetotelluric data and their correlation to the distribution of mineral deposits. *Minerals*, 2023, vol. 13, no. 2, 225 p. DOI: 10.3390/min13020225
- 22. Schwarz G., Haak V., Martinez E., Bannister J. The electrical conductivity of the Andean crust in northern Chile and southern Bolivia as inferred from magnetotelluric measurements. *Journal of Geophysics*, 1984, vol. 55, no. 1, pp. 169–178.
- Yang B., Egbert G.D., Kelbert A., Meqbel N.M. Three-dimensional electrical resistivity of the north-central USA from Earth Scope long period magnetotelluric data. *Earth and Planetary Science Letters*, 2015, vol. 422, pp. 87–93. DOI: 10.1016/j.epsl.2015.04.006
- 24. Alabin L.V. Structural-formational and metallogenic zonality of the Kuznetsk Alatau. Novosibirsk, Nauka Siberian Branch Publ., 1983. 113 p. (In Russ.)
- 25. Chernykh A.I. Geological-mineralogenic mapping for gold on a scale of 1:500000 of the North-Western part of the Altai-Sayan folded region (tasks, methodology, results). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2009, vol. 314, no. 1, pp. 16–22. (In Russ.)
- 26. Ivanova G.M., Ilyenok S.S. Endogenous gold mineralization of the south of the Tomsk region. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 1970, vol. 239, pp. 318–321. (In Russ.)

#### Information about the authors

**Anna A. Zaplavnova**, Junior Researcher, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch Russian Academy of Sciences, 3, Koptyug avenue, Novosibirsk, 630090, Russian Federation; ZaplavnovaAA@ipgg.sbras.ru; https://orcid.org/0000-0002-0775-3908

**Vladimir V. Olenchenko**, Cand. Sc., Associate Professor, Novosibirsk State University, 1, Pirogov street, Novosibirsk, 630090, Russian Federation; Leading Researcher, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch Russian Academy of Sciences, 3, Koptyug avenue, Novosibirsk, 630090, Russian Federation; OlenchenkoVV@ipgg.sbras.ru, https://orcid.org/0000-0002-4386-7064

**Elena V. Pospeeva**, Dr. Sc., Leading Researcher, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch Russian Academy of Sciences, 3, Koptyug avenue, Novosibirsk, 630090, Russian Federation; PospeevaEV@ipgg.sbras.ru, https://orcid.org/0000-0002-5714-5652

**Polina S. Osipova**, Junior Researcher, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch Russian Academy of Sciences, 3, Koptyug avenue, Novosibirsk, 630090, Russian Federation; Osipovaps@ipgg.sbras.ru; https://orcid.org/0000-0003-0510-6333

**Boris B. Logutov**, Chief Geologist, Limited Liability Company «Inert-Stroy», 20A, Nechevsky lane, Tomsk, 634061, Russian Federation. perm193xp@gmail.com

Received: 15.04.2024 Revised: 19.06.2024 Accepted: 02.04.2025 UDC 628.179.3 DOI: 10.18799/24131830/2025/5/4682 Scientific paper

## Assessment of water losses in internal water supply networks

## A.A. Sahakyan<sup>⊠</sup>

National University of Architecture and Construction of Armenia, Yerevan, Armenia

<sup>™</sup>sahakyan.aram@nuaca.am

Abstract. Relevance. The article presents comprehensive studies of water loss assessment in the internal water supply networks. In order to increase the practical value of the studies, in a number of settlements of the Republic of Armenia, systems of internal water supply networks with different technical conditions (number of floors, amount of pressure in the network, year of construction, type of gauging device, etc.) were selected. In terms of these conditions the loss assessment analyses were implemented, taking into account the local conditions. The paper introduces the proposals aimed at reducing the volumes of unaccounted water amounts. Aim. Based on the importance of the issue, we have carried out assessment studies of the loss components of the system, as the correct assessment is important for increasing the efficiency of detection of general leakages of the water supply system. Water balance of the settlements was developed, based on the loss assessment studies carried out in the original conditions and the structure of the housing stock. In the work aimed at increasing the efficiency of water supply system, it became clear that the correct assessment of the components of losses leads to the systematic execution of targeted actions of discovering the loss of the system and their recovery, as well as the development of a road map of reconstruction processes. **Objects.** Water balance supplied for drinking and economic purposes, as well as the components of supplied water. *Methods.* Well-known hydraulic principles and laws. Experimental studies were conducted directly on the water supply network while it is operating. Results. The studies carried out in different settlements show that the unaccounted water amount in the internal water supply network is almost equal to the volume of the sold water amount. In the system which has 71.4% water loss, unaccounted water volume caused by low accuracy of water meters and the emergency condition of internal networks of private houses is over 27.7%.

Keywords: water supply network, water loss, water balance, internal network, efficiency

**For citation:** Sahakyan A.A. Assessment of water losses in internal water supply networks. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 5, pp. 76–84. DOI: 10.18799/24131830/2025/5/4682

УДК 628.179.3 DOI: 10.18799/24131830/2025/5/4682 Научная статья

## Оценка потерь воды во внутренних сетях водоснабжения

## А.А. Саакян⊠

Национальный университет архитектуры и строительства Армении, Армения, г. Ереван

<sup>⊠</sup>sahakyan.aram@nuaca.am

Аннотация. Актуальность. Приведены комплексные исследования по оценке потерь воды во внутренних сетях водоснабжения. С целью повышения практической ценности исследований в ряде населенных пунктов Республики Армения были выбраны системы внутренних сетей водоснабжения с различным техническим состоянием (этажностью, величиной давления в сети, годом постройки, типом измерительного устройства и др.), в рамках которых были проведены анализы по оценке потерь с учетом местных условий, а также представлены предложения, направленные на сокращение неучтенных объемов воды. *Цель.* Исходя из важности проблемы, нами были проведены оценочные исследования компонентов потерь из системы, так как правильная оценка важна для повышения эффективности обнаружения общих утечек системы водоснабжения. В ходе работы, направленной на повышение эффективности системы водоснабжения, выяснилось, что правильная оценка составляющих потерь приводит к системному выполнению целевых действий по обнаружению утечек из системы и их восстановлению, а также разработке дорожной карты процессов реконструкции. **Объекты**. Для оценки потерь в системе был изучен баланс воды, отпускаемой на питьевые и хозяйственные нужды, а также компоненты подаваемой воды. **Методы**. Расчеты проводились с использованием известных гидравлических принципов и законов. Экспериментальные исследования проводились непосредственно на сети водоснабжения в процессе эксплуатации. **Результаты**. Исследования, проведенные в разных населенных пунктах, показали, что неучтенное количество воды во внутренней сети водопровода практически равно объему проданной воды. Кроме того, по нашим исследованиям, в системе, где потери воды составляют 71,4 %, более 27,7 % – неучтенные объемы воды, что обусловлено низкой точностью показаний счетчиков воды и аварийным состоянием внутренних сетей частных домов.

Ключевые слова: водопроводные сети, потери воды, водный баланс, внутренняя сеть, эффективность

**Для цитирования:** Саакян А.А. Оценка потерь воды во внутренних сетях водоснабжения // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 5. – С. 76–84. DOI: 10.18799/24131830/2025/5/4682

#### Introduction

The access to water is crucial for life, prosperity, and all human activities [1]. Water resources must be used effectively to meet the demand of the evergrowing population, considering the limited and dwindling water availability [2]. Water distribution networks face growing pressures from rising population levels, increased urbanisation, more significant uncertainty in supply due to climate change, rising energy prices, volatile global economy, and more complex social and regulatory environment [3].

The water loss is either leakage or real loss occurring in pipes, storage reservoirs, and customer connections or apparent loss occurring due to customer meter under registration, errors in data handling and billing, or unauthorised use [4]. The non-revenue water includes not only the real losses, but also the apparent losses and the unbilled authorized consumption. Real water losses consist of the physical losses along the system down to the water meters of the clients, which comprise all leakage (from cracks and fractures) and reservoir overflows. The apparent losses cover the nonauthorized consumption as well as consumed water that is not metered, data handling and billing errors, underestimation of unmeasured consumption, and client metering inaccuracies [5]. Leakages or unused water amount are useless costs: technical losses from structures, malfunctions of pipelines and equipment and accidents in the form of leakages, as well as illegal connections. Reducing losses will significantly increase the efficiency of the water supply system It is obvious that reducing leakages enables the reduction of water production. In the field of leakage management of water flow distribution networks, leakage detection is a critical research subject [6].

For most developing countries, the apparent water losses can be the major problem due to illegal connections and water theft. Illegal connections are also wasteful expenses, commonly referred to as commercial losses. The responsibility for their registration, detection and bringing them into the legal framework derives from the interests of the water supply organization. Recently, during January 2024, 3048 gauging devices were calibrated in the water supply system of different settlements of the Republic of Armenia (RA). The analysis of the results of the laboratory calibration of the water meters showed that about 41% of the water meters (or 1235 water meters) are malfunctioning or have external interference (the results were taken from monthly Report of the Water Supply Company in RA).

Leakage due to pipe bursts is a major inefficiency in water distribution networks and over 20% of the water entering public supply in England and Wales is lost as leakage, a wastage of over 50 litres per person per day [7]. The annual water loss volume worldwide is substantial; it has been estimated to be 126 billion cubic meters, which costs about USD 39 billion annually [8].

#### Literature review and problem statement

Traditional leakage identification and analysis methods are unable to offer a rapid response [9]. However, thorough methods for water loss assessment were not available two decades ago [10]. Later, significant advancements were made due to the development of new concepts and methods for water loss management [11]. The components of water loss can be assessed using the common top-down water audit methodology [12] or, alternatively, by establishing a water and wastewater balance [13]. Leakage can also be estimated using Minimum Night Flow analysis [14, 15] or the component analysis of the leakage [16]. Yet, these methods use different approaches (and scales) to estimate the water loss components and thus different corrective measures are prioritized [17] and different economic levels of leakage are planned, contributing to less effective water loss management. Reducing all water losses components to zero is neither technically possible [18] nor economically feasible because the greater the level of the resources employed is, the lower are the additional marginal benefits [19, 20].

Based on the importance of the issue, we have conducted loss assessment studies. In order to increase the practical significance of the work, in a number of settlements of the RA, where water supply services are provided by a private operator, internal water supply network systems with different technical conditions (number of floors, amount of pressure in the network, year of construction, type of gauging device, etc.) were selected, in terms of which tests and various reconstruction operations were carried out. Operational experience shown that the correct assessment of loss components is important for increasing the efficiency of detection of total leakage from the water supply system [21].

#### Materials and methods

Al Washali et al reviews some methods to assess water loss [22]. The most accepted indicators of them are as follows [23]:

- 1. Losses in volume of water:
  - a) per length of mains per unit of time;
  - b) per length of system per unit of time;
  - c) per property per unit of time;
  - d) per connection per unit of time;

e) per connection per unit of time and per unit of system pressure.

- 2. Non-revenue water as a percentage of system input water volume.
- 3. Infrastructure leak index, which relates the annual and unavoidable actual losses.

Some authors suggest using hydraulic models to detect leakages in water supply networks [24–26]. Considering the importance of the issue, the International Water Association (IWA) was founded in order to coordinate the working groups on water losses, to improve the water loss index, and to develop management procedures. One of the goals of the association is also to develop a methodology to identify and detect those parts of the water supply network where there are high levels of leakages [27].

Taking into account the provisions of the existing methods, as well as our own studies, we conducted research on the assessment of the components of water losses in the water supply systems of the RA and presented recommendations to reduce the volume of unaccounted water amounts.

In order to assess losses from the system, we have studied the water balance of water supplied for drinking and economic purposes in the RA settlements (Fig. 1), as well as the components of the sold water amount (Fig. 2) for 2022.



**Рис. 1.** Водный баланс 2022 г.

According to the conducted research, the loss in the studied system is 71.4%, and the main part of the sold water amount is utilized in the sector of residential customers, but it is only 18.4% of the produced water (Fig. 2). Based on the aforementioned, we believe that the indicated index is not satisfactory, and there is a need to carry out original studies in order to assess the losses in the indicated area.

In order to fully calculate the water losses (losses) from the water supply system of the RA settlements, we separately assessed the following two components:

- losses from internal networks of housing blocks,
- • losses from internal networks of private households.

In order to solve the posed issue, the structure of the RA housing stock was also studied, which is presented in Table 1.



**Рис. 2.** Компоненты объема проданной воды в 2022 г.

Table 1.	Number	of ap	artments	of	housing	blocks	and
	private ho	ouses	per the R	A M	arzes, 20	22	

Таблица 1. Количество квартир в многоквартирных домах и частных домах по марзам Республики Армения (РА), 2022 г.

	Apartments in housing	Private hous-	
RA Settlements	blocks, units	es, units	
Населенные пункты РА	Квартиры в жилых	Частные	
	домах, кол-во	дома, кол-во	
Yerevan/Ереван	250872	64843	
Other settlements	200021	2(2(20	
Другие населенные пункты	209931	362620	
Total/Bcero	460803	427463	

According to the presented data, the RA housing stock consists of 461000 (52%) apartments and 427000 (48%) private houses, and the majority of housing blocks are located in Yerevan City, and private houses are located in the rest of the settlements. Based on the aforementioned, in order to increase the degree of accuracy of the results of the research, the assessment works of losses in housing blocks were carried out in the water supply network of Yerevan City, while that of the private sector – in other settlements.

In order to have the fundamental answer to the mentioned issues, the article presents our studies of 2022. Based on them, all the provisions given in the article were tested during the operation of the existing water supply systems and received a positive result.

#### Discussion and results Assessment of losses in internal networks of housing block

According to the data of Statistical Committee of Armenian Republic out of the 888266 apartments of the RA housing stock, 460803 are apartments in housing blocks. Taking into account that the density of housing blocks in Yerevan exceeds the same indicator of other settlements several times, therefore, in order to increase the accuracy of the calculations, further studies were carried out in the water supply network of Yerevan itself. The conducted studies shown that the internal water supply and drainage networks of the housing blocks that are the subject of the research are in a technically poor condition. If some repairing works were carried out by the residents in the area of the basement floors, then no investments were made on the water supply and especially the drainage pipelines in the area from the building water meter assembly to the external network in the last 20–30 years, except for the partial repairing works conducted by the local self-government bodies in the internal water supply network of the buildings.

It is also necessary to mention that currently there are privatized facilities of various purposes in the internal networks, which in their turn not only do not try to maintain the systems located in these areas, but by performing certain reconstructions of the basements, they make it more difficult to maintain the systems.

There are about five thousand 4 to 16-storey housing blocks in Yerevan. The studies were implemented in all districts of Yerevan city using water meters of various degrees of accuracy, as well as selecting buildings of different floors which were built in different years and have one or more water supply points. In order to clearly assess the volume of unaccounted water amount caused by gauging devices installed in the building, targeted and original experimental studies requiring large investments were carried out. Their purpose was to replace the water meters installed in all apartments of the buildings separated by the selective principle with water meters of class B and C with acceptable accuracy. As well as to identify the volumes of losses caused by inaccuracies and various manipulations of gauging devices.

11 housing blocks with a total of 668 apartments were selected in Yerevan, on the entry lines of which high-accuracy class C gauging devices of the "SENSU" brand were installed. Gauging devices in all apartments were replaced with highly accurate B and C class "Actaris" water meters. Fig. 3 shows the results recorded in one of the buildings, where before replacing the water meters, the amount of water entering the building was  $6072 \text{ m}^3$ /month, and the amount of water forming revenue was  $2607 \text{ m}^3$ /month, therefore the loss in the internal network was 43%. Three months after replacing the water meters, the amount of water entering the building was  $4400 \text{ m}^3$ /month (decreased by  $1672 \text{ m}^3$ ), and the revenue was  $3630 \text{ m}^3$ /month (increased by  $1023 \text{ m}^3$ ), therefore, the loss decreased and amounted to 17.5% (Fig. 3).



Fig. 3. Results of replacing water meters in a housing block Puc. 3. Результаты замены счетчиков воды в многоквартирном доме

Analyzing the results of the loss assessment of the internal networks of the selected buildings, it can be stated that the unaccounted water amount generated from the gauging devices installed in the apartments of housing blocks and the internal networks of the buildings (from the general gauging device of the building to the customer's apartment) is about 57% of the water supplied to the building (in the calculations 55% is considered). By the way, after installing class B or C water meters with different degrees of accuracy, the amount of loss in the internal networks of buildings ranged from 14 to 18 percent. And since the cost of a high class C water meter is 3–4 times higher than the cost of a class B water meter, it was economically impractical to acquire class C water meters.

Based on the results of the studies, the efficiency of the internal networks of housing blocks can be assessed with the following expression:

$$W_{unac.w} = (W_1 - W_2) - (W_3 - W_4),$$
 (1)

where  $W_1$  and  $W_3$  are the water amounts supplied to the building before and after the replacement of the water meters (m<sup>3</sup>/month), while  $W_2$  and  $W_4$  are the monthly utilized water amounts before and after the replacement of the water meters (m<sup>3</sup>/month).

Taking into account the fact that before the replacement of water meters, the water amount provided to any building under study is about 2.2 times higher than the sold water amount, and after the replacement of water meters - only 1.18 times, the following expression can be written:

$$W_{unac.w} = (2,2W_2 - W_2) - (1,18W_4 - W_4) = 1,2W_2 - 0,18W_4.$$
 (2)

Based on the results of the tests, if we accept that the water amount sold before the studies was almost 30% less than the water amount sold after the replacement of water meters, the following can be written:  $W_4/W_2=1.3$ . In this case, expression (2) will take the following form:

$$Q_{unac.w.} = 1,2W_2 - 0,18 \times 1,3W_2 \approx W_2.$$
(3)

Therefore, the unaccounted water amount in the internal networks can be assessed by expression (3).

During 2022, the water amount sold in housing blocks was 49.9 million  $m^3$ , applying the above expression; it can be stated that there is about 50 million  $m^3$ /year of water loss in the internal networks of housing blocks, which is almost 9.0% of the amount of water produced. Summarizing, it can be said that large water loss in the internal networks of housing blocks is caused by the inaccuracy of the gauging devices installed in the apartments and the commercial losses caused by affecting them in various ways.

## Assessment of leakages from the internal network of private households

In Armenia 362620 of the 427463 units of private houses available in the housing stock are located in 10 marzes, so in order to increase the degree of accuracy of the research, the studies were carried out in the marz settlements. During the conducted studies, the rate of water losses in private households was assessed. The losses are mainly caused by hidden accidents on the entry lines, inaccuracies of gauging devices, as well as illegal connections.

Through the analysis of the results of studies carried out on Hatis street of Abovyan City and 5 streets of other settlements in the RA, the work was carried out aimed at assessing the volume of unaccounted water amount.

The following activities were carried out during the studies on Hatis street:

- the entry lines of all 115 private houses were reconstructed, up to the boundary separating the customer's area from the street (enclosure, fence, etc.), where water meter wells were installed;
- water meters calibrated in the hydrometric laboratory were installed on the entry lines feeding the private houses. The water meter assemblies were taken out of the territory owned by the customer and installed in the wells on the sidewalk;
- using special tools (flow meter, leak noise correlator, aquaphone) and gradual testing at night, all hidden accidents were identified and eliminated;
- registration of water meter readings was carried out twice a month before the start of construction works and after the completion of the works.

The changes in the outputs recorded after the listed works are shown in Fig. 4.

The d=160 mm diameter steel pipeline located in the studied section of Hatis street was built in the late 1970s. It passes along the sidewalk and is affected by small dynamic forces as a result of the non-intensive traffic of the street. The pipeline is fed from the Abovyan daily regulation reservoir and provides 24-hour water supply to 115 customers. The pressure in the water line ranges from 2.8 to 3.2 atm and is mostly stable because it is within the service range of the pressure regulator.

In order to present the picture more clearly, the volumes of water supply and consumption recorded during the test are shown in Table 2. It is important to note that the pressure in the street water supply system remained almost constant during the test.

As it can be seen from the presented results, the water amount consumed on Hatis street decreased from 7100 to 2820 m<sup>3</sup> and amounted to 4280 m<sup>3</sup>, while the utilized water amount increased by 1077 m<sup>3</sup> and amounted to 3295 m<sup>3</sup>. In this case, expression (1) can also be used, where  $W_1$  and  $W_3$  are the water amounts entering the district before reconstruction and after reconstruction (m<sup>3</sup>/month), and  $W_2$  and  $W_4$  are the water amounts sold before reconstruction and after reconstruction (m<sup>3</sup>/month). Taking into account that before the implementation of the works, the volume of water amount entering the district was 3.2 times more than the sold water amount, and after the works it was 1.3 times, so in this case the expressions (4) and (5) can be written:

$$W_{unac,W} = (3,2W_2 - W_2) - (1,3W_4 - W_4) = 2,2W_2 - 0,3W_4.$$
 (4)



Fig. 4. Hatis street water supply scheme Puc. 4. Схема водоснабжения улицы Атис

Table 2.	Results of research conducted in the section of private households
Таблица 2.	Результаты исследования, проведенного в секции частных домохозяйств

Water amounts of network sections	Water amour Объем вод	nt, m³/month ,ы, м³/мес.	Test results Результаты испытаний		
Объёмы воды на участках сети	before the work was done до проведения работ	after the work was done после окончания работ	m <sup>3</sup>	%	
Entering Hatis street/Въезд на улицу Атис	14870	12320	-2550	-17,15	
Towards housing blocks На пути к многоквартирным домам	6480	6490	10	0,15	
Towards the first lane/К первой полосе	1290	1550	260	20,16	
Water amount consumed in the studied section of Hatis street (households) Количество потребляемой воды на исследуемом участке улицы Атис (домохозяйства)	7100	4280	-2820	-39,72	
Water amount sold in the studied section of Hatis street (households) Количество воды, реализуемой на исследуемом участке улицы Атис (домохозяйства)	2218	3295	1077	48,56	

Based on the test results, if we accept that the water amount sold before the studies was almost 1.5 times less than the water amount sold after the works, then it will be  $W_4=W_2/1.5$ , so we will have the following:

$$W_{unac.w.}=2,2W_2-0,2W_2=2,0W_2.$$
 (5)

In other words, it can be stated that the specific weight of the unaccounted water amount in the private sector, compared to the sold water amount, almost doubles the same indicator of housing blocks.

Under original conditions, similar tests were carried out on Nairyan and Yeritasardakan streets of Abovyan City, as well as on Teryan, Rustaveli and Lazo streets of Gyumri City, and almost the same results were obtained in all cases (Table 3).

During 2022, the water amount sold in the private sector was 49.9 million  $m^3$ . Applying the above expression, it can be concluded that there was almost 100 million  $m^3$  of unaccounted water amount in the internal

network of the private sector per year, which was 18.5% of water production.

Table 3.Results of studies carried out in the private sectorТаблица 3.Результаты исследований, проведенных в<br/>частном секторе

	Объем вод	ы, м³/мес./V	Vater amount,	m³/month		
	supplied/n	одаваемой	sold/реализуемой			
Street Names	before the	after the	before the	after the		
	work was	work was	work was	work was		
пазвания улиц	done	done	done	done		
	до	после	до	после		
	проведения	окончания	проведения	окончания		
	работ	работ	работ	работ		
Nairyan/Наирян	77760	81300	22062	33131		
Yeritasardakan	120600	70570	20212	F6F21		
Еритасардакан	129600	70570	39312	50551		
Teryan/Терян	25920	20800	7812	12790		
Lazo/Лазо	36288	15230	12230	14676		
Rustaveli	46656	27550	14251	22025		
Руставели	40050	27550	14251	23035		

Analyzing the results of the study, it can be concluded that the inputs to private households were once carried out with gross violations of technical norms, which leads to the occurrence of hidden accidents, in particular:

- the necessary burial depths of the pipes were not observed;
- built with poor quality pipes;
- construction and installation works were carried out by people without professional qualifications;
- in many cases, after reconstruction of the entry line of the house by the resident, the previous water line was not dismantled, which caused both commercial and hidden leakage;
- due to the location of the water meter assembly on the owner's territory, it was possible to make illegal connections to the gauging device for irrigation and water intake for other purposes;
- after the replacement of the water lines implemented in the streets during the Soviet years, the old water lines were not decommissioned and therefore many private houses have two water connections, from the old and new water lines, one of which is illegal.

#### Assessment of components of losses in Yerevan water supply systems

The results of the comprehensive research on unaccounted water amounts in the internal water supply network are summarized in Table 4.

Table 4.	Water balance of Yerevan water supply systems
Таблица 4.	Водный баланс систем водоснабжения горо-
	да Еревана

Common and a Guine converte doubter	Unaccounted water amount Неучтенный объём воды					
components of unaccounted water amount Составляющие неучтенного количества воды	million m³/year млн м³/год	in % to pro- duced water в % к добываемой воде				
Housing blocks/Жилые блоки	50,0	9,2				
Private households Частные домохозяйства	100,0	18,5				
Total losses from internal networks Общие потери от внутренних сетей	150,0	27,7				
Sold water amount Количество проданной воды	155,1	28,6				
Total (produced water amount) Итого (объем добываемой воды)	541,5	100,0				

The studies carried out in different settlements show that the unaccounted water amount in the internal water supply network is almost equal to the volume of the sold water amount. In the system which has 71.4% water loss, over 27.7% of it is unaccounted water volume caused by low accuracy of water meters and the emergency condition of internal networks of private houses, and 43.7% is the water loss in the external water supply system (Fig. 5).





#### Conclusions

- 1. Research conducted under real conditions showed that internal water supply systems are in poor condition. Technical losses and unaccounted consumption of water in the water supply system of housing blocks and private houses make up 27.7% of the produced water.
- 2. In order to improve the operation of the internal water supply and drainage system of housing blocks and inventory water losses reaching up to 60% and then to eliminate them, it is recommended to carry out urgent investments.
- 3. According to the technical-economic calculations, the investments made in order to eliminate the above-mentioned loss are perhaps the most effective means for reducing the amount of unaccounted water, because according to the provisions of the article, in order to eliminate the uninventoried water amount that constitutes huge volumes in internal networks, it is enough to replace the gauging devices with the ones having the highest accuracy, and in the case of private houses, the entry lines of the latter as well.
- 4. It is necessary to define the priority of the distribution network zoning, to detect and eliminate losses at the current stage, considering the technical condition of the system.

#### **REFERENCES/СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

- 1. Dighade R., Kadu M., Pande A. Challenges in water loss management of water distribution systems in developing countries. *Int. J. Innov. Res. Sci. Eng. Technol.*, 2014, no. 3 (6), pp. 13838–13846.
- Khaled O., Nabila S., Enas T.S., Mohammad A.A., Mohamed S., Olabi A.G. The role of wastewater treatment in achieving sustainable development goals (SDGs) and sustainability guideline. *Energy Nexus*, 2022, vol. 7. DOI: https://doi.org/10.1016/j.nexus.2022.100112
- Godde C.M., Mason-D'Croz D., Mayberry D.E., Thornton P.K., Herrero M. Impacts of climate change on the livestock food supply chain; a review of the evidence. *Global Food Security*, March, 2021, vol. 28, 100488. DOI: https://doi.org/10.1016/j.gfs.2020.100488
- 4. Lambert A., Hirner W. Losses from water supply systems: a standard terminology and recommended performance measures. London, UK, IWA Publ., 2000. 13 p.
- 5. Meireles I., Sousa V., Pedro Matos J., Oliveira Cruz C. Determinants of water loss in Portuguese utilities. *Utilities Policy*, 2023, vol. 83, 101603. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jup.2023.101603
- 6. Sostero L., Pagano D., Bodini I. Investigating the possibility of leakage detection in water distribution networks using cosmic ray neutrons in the thermal region. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2024, vol. 1059, 168951. DOI: https://doi.org/10.1016/j.nima.2023.168951
- McMillan L., Fayaz J., Varga L. Domain-informed variational neural networks and support vector machines based leakage detection framework to augment self-healing in water distribution networks. *Water Research*, 2024, vol. 249, 120983. DOI: https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.120983.
- 8. Taha AbuEltayef H., Khaldoun S. AbuAlhin, Khalil M. Alastal. Addressing non-revenue water as a global problem and its interlinkages with sustainable development goals. *Water Practice and Technology*, 2023, vol. 18 (12), pp. 3175–3202. DOI: https://doi.org/10.2166/wpt.2023.157.
- "Proactive" approach to leaks required to meet tough Ofwat targets, 2023. *Glob. Water Intell*, Jul. 23, 2020, no. 21 (7). Available at: https://www.globalwaterintel.com/global-water-intelligence-magazine/21/7/smart-water-watch/proactive-approach-to-leaksrequired-to-meet-tough-ofwat-targets (accessed: 16 February 2025).
- 10. AL-Washali T. Methods of water loss component assessment: a critical review. *Water Loss Assessment in Distribution Networks*, 2021, 1<sup>st</sup> ed. DOI: 10.1201/9781003167938-2
- 11. Mutikanga H. Water loss management: tools and methods for developing countries. PhD Thesis. Delft, The Netherlands, 2012. 276 p.
- 12. AWWA, M36. Water Audits and Loss Control Programs. 4th ed. American Water Works Association, USA, 2016.
- 13. AL-Washali T.M., Sharma S.K., Kennedy M.D. Alternative method for nonrevenue water component assessment. J. Water Resour. Plan. Manage, 2018, vol. 144 (5), 04018017.
- 14. Eugine M. Predictive leakage estimation using the cumulative minimum night flow approach. Am. J. Water Resour, 2017, no. 5 (1), pp. 1–4.
- 15. Farah E., Shahrour I. Leakage detection using smart water system: combination of water balance and automated minimum night flow. *Water Resour. Management*, 2017, vol. 31 (15), pp. 4821–4833.
- AL-Washali T., Sharma S., Kennedy M. Methods of assessment of water losses in water supply systems: a review. Water Resour. Management, 2016, no. 30 (14), pp. 4985–5001.
- 17. AL-Washali T.M., Sharma S.K., Kennedy M.D., AL-Nozaily F., Mansour H. Modelling the leakage rate and reduction using minimum night flow analysis in an intermittent supply system. *Water*, 2019b, no. 11 (1), 15 p.
- Lambert A., Charalambous B., Fantozzi M., Kovac J., Rizzo A., John S. 14 years' experience of using IWA best practice water balance and water loss performance indicators in Europe. *Proceedings of IWA Specialized Conference: Water Loss 2014*. Vienna, 2014.
- 19. Ashton C., Hope V. Environmental valuation and the economic level of leakage. Urban Water, 2001, no. 3 (4), pp. 261–270.
- 20. Kanakoudis V., Tsitsifli S., Papadopoulou A. Integrating the carbon and water footprints' costs in the water framework directive 2000/60/EC full water cost recovery concept: basic principles towards their reliable calculation and socially just allocation. *Water*, 2012, no. 4 (1), pp. 45–62.
- 21. Sahakyan A. Hydraulic pressure management of Yerevan City's water supply systems. *Journal of Architectural and Engineering Research*, 2022, no. 3, pp. 78–84. DOI: https://doi.org/10.54338/27382656-2022.3-009
- AL-Washali T., Sharma S., Kennedy M. Methods of assessment of water losses in water supply systems: a review. *Water Resour. Management*, 2016, no. 30 (14), pp. 4985–5001.
- 23. Rubinstein R.Y., Kroese D.P. Simulation and the Monte Carlo Method. Hoboken, New Jersey, John Wiley & Sons, 2016. 377 p.
- 24. Almandoz J., Arregui F., Cabrera E., Cobacho R. Leakage assessment through water distribution network simulation. J. Water R. P. and M., 2005, vol. 131, no. 6, pp. 458–466.
- 25. Wu Z., Sage P. Water loss detection via genetic algorithm optimization-based model calibration. *Annual International Symp. on Water Distribution System Analysis*, 2006. 11 p.
- 26. Pérez R., Puig V., Pascual J., Quevedo J., Landeros E., Peralta A. *Leakage isolation using pressure sensitivity analysis in water distribution networks: application to the Barcelona case study, LSS2010.* Lille (France), 2010. pp. 1–6.
- Quevedo J., Pérez R., Pascual J., Puig V., Cembrano G., Peralta A. Methodology to detect and isolate water losses in water hydraulic networks. 8<sup>th</sup> IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety of Technical Processes (SAFEPROCESS). Mexico City, Mexico, August 29–31, 2012. pp. 922–927.

#### Information about the author

**Aram A. Sahakyan**, PhD, Assistant, Dean of the Faculty of Construction, National University of Architecture and Construction of Armenia, 105, Teryan street, Yerevan, 0009, Armenia, sahakyan.aram@nuaca.am; https://orcid.org/0000-0002-4163-9949

Received: 06.05.2024 Revised: 10.08.2024 Accepted: 02.04.2025

#### Сведения об авторе

**Арам Ашотович Саакян**, кандидат технических наук, ассистент кафедры водных систем, гидротехники и гидроэнергетики, декан факультета Строительства Национального университета архитектуры и строительства Армении, Армения, 0009, г. Ереван, ул. В. Теряна, 105, sahakyan.aram@nuaca.am; https://orcid.org/0000-0002-4163-9949

Поступила в редакцию: 06.05.2024 Поступила после рецензирования: 10.08.2024 Принята к публикации: 02.04.2025 УДК 556.314 DOI: 10.18799/24131830/2025/5/4938 Шифр специальности ВАК: 1.6.6 Обзорная статья

## Формы миграции химических элементов в термальных водах Байкальской рифтовой зоны

## Е.В. Домрочева<sup>⊠</sup>, Е.В. Зиппа

Томский филиал Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, Россия, г. Томск

<sup>⊠</sup>DomrochevaYV@ipgg.sbras.ru

Аннотация. Актуальность. Рассматриваются азотные термальные воды Байкальской рифтовой зоны, обогащенные различными элементами, включая Na<sup>+</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> и ряд микроэлементов (Sr<sup>2+</sup>, Br, Li, Al, F<sup>-</sup> и др.). Факторы, такие как высокая температура, щелочные условия и окислительно-восстановительные процессы, влияют на растворимость и стабильность соединений, определяя их формы миграции. Понимание процессов миграции химических элементов помогает раскрыть механизмы геохимических процессов в целом. *Цель*. Определение форм миграций основных ионов и некоторых микрокомпонентов в термальных водах. *Объекты*. Термальные источники центральной части Байкальской рифтовой зоны. *Методы*. Анализ химического состава терм и С<sub>орг</sub>. осуществлялся классическими химическими и инструментальными методами в аккредитованных лабораториях Института природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН (г. Чита) и кафедры радиохимии МГУ. Расчёт форм миграции химических элементов осуществлялся с использованием программного комплекса HydroGeo. *Результаты и выводы*. Установлено, что основные катионы мигрируют в простой ионной форме. Основные катионы Na<sup>+</sup> и K<sup>+</sup> мигрируют преимущественно в простой ионной форме (более 90 % для Na<sup>+</sup> и более 80 % для K<sup>+</sup>), тогда как Ca<sup>2+</sup> и Mg<sup>2+</sup> имеют значительно меньшие доли (30–50 и 20–25 % соответственно). Комплексообразование в основном связано с сульфатами, особенно для Ca, Mg, Li, Na и K. Карбонатные комплексы образуются с Fe, Mn и Li. Карбонатные формы в щелочных термальных водах практически отсутствуют ввиду низкой растворимости карбонатов при повышенной температуре.

**Ключевые слова:** формы миграций, основные ионы, термодинамическое моделирование, гидрогеохимия, термальные воды, Байкальская рифтовая зона

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-77-10035, https://rscf.ru/project/24-77-10035/.

**Для цитирования:** Домрочева Е.В., Зиппа Е.В. Формы миграции химических элементов в термальных водах Байкальской рифтовой зоны // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 5. – С. 85–99. DOI: 10.18799/24131830/2025/5/4938

UDC 556.314 DOI: 10.18799/24131830/2025/5/4938 Review article

## Forms of migration of chemical elements in thermal waters of the Baikal rift zone

#### E.V. Domrocheva<sup>⊠</sup>, E.V. Zippa

Tomsk Branch of the Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of SB RAS, Tomsk, Russian Federation

<sup>™</sup>DomrochevaYV@ipgg.sbras.ru

Abstract. This paper discusses N<sub>2</sub>-thermal waters of the Baikal Rift Zone, enriched in various elements, including Na, SO<sub>4</sub>, F and a number of trace elements (Sr, Br, Li, Al etc.). Temperature, alkaline conditions and oxidation-reduction processes affect the solubility and stability of compounds, determining their migration forms. Understanding migration chemical elements helps to reveal the mechanisms of geochemical processes in general. This is extremely important for understanding the formation of natural waters composition as well as for assessing the climate change impact on the regional ecosystems. Aim. To calculate the migration forms for main ions and some trace elements in thermal waters of the Baikal Rift Zone. *Objects.* Thermal springs of the central part of the Baikal Rift Zone. *Methods.* Chemical composition of therm and Corg was analyzed in the certified laboratory of Geoecology and Hydrogeochemistry of the Institute of Natural Resources and Ecology of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Chita, Russia). Trace elements analysis and determination of total organic carbon were carried out at the Department of Radiochemistry of Moscow State University. Migration forms of chemical elements were calculated using the HydroGeo software package. Results and conclusions. It was obtained that cations migrate in simple ionic species. The main cations  $Na^+$  and  $K^+$  migrate predominantly in simple ionic species (more than 90% for Na<sup>+</sup> and more than 80% for K<sup>+</sup>), while Ca<sup>2+</sup> and Mg<sup>2+</sup> have significantly lower (30–50 and 20–25%, respectively). Complexation is mainly associated with sulfates, especially for Ca, Mg, Li, Na and K. Carbonate complexes are formed with Fe, Mn and Li. Carbonate species are practically absent in alkaline thermal waters due to the low solubility of carbonates at elevated temperatures.

Keywords: migration forms, main ions, thermodynamic modeling, hydrogeochemistry, thermal waters, Baikal rift zone

**Acknowledgements:** This work was supported by the Russian Science Foundation [grant no. 24-77-10035, https://rscf.ru/en/project/24-77-10035/]. The authors thank Olesya E. Lepokurova, Dr Sc., Director of the Institute of Geology and Geophysics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

**For citation:** Domrocheva E.V., Zippa E.V. Forms of migration of chemical elements in thermal waters of the Baikal rift zone. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 5, pp. 85–99. DOI: 10.18799/24131830/2025/5/4938

#### Введение

Изучение форм миграции химических элементов в термальных водах представляет собой важную и актуальную проблему, имеющую большое значение как для научного понимания геохимических процессов, так и для практических приложений в области экологии, геологии и ресурсного менеджмента. Гидротермальные системы гранитных массивов, обладая уникальными физикохимическими и термодинамическими свойствами и формируя термальные растворы, создают особые условия для миграции различных элементов, что может значительно отличаться от поведения тех же элементов в обычных пресных или морских водах и оказывать влияние на формирование состава терм в целом.

Одним из ключевых аспектов при рассмотрении процессов и механизмов формирования геохимического облика термальных вод является определение форм миграции химических элементов. В настоящей работе рассматриваются азотные и азотнометановые щелочные термальные воды Байкальской рифтовой зоны, которые содержат органическое вещество, обогащены Na<sup>+</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, F<sup>-</sup>, Si, и др. элементами и характеризуются различным окислительно-восстановительным потенциалом [1]. Высокая температура, щелочные условия среды, разная окислительно-восстановительная обстановка, а также насыщение газами влияют на растворимость и стабильность различных соединений, что, в свою очередь, определяет их миграцию и перераспределение. Например, высокие температуры могут способствовать увеличению растворимости некоторых металлов, что приводит к их более активной миграции. Также важным аспектом является взаимодействие термальных вод с вмещающими горными породами. Процессы окисления и восстановления, а также взаимодействия с минералами могут приводить к изменению форм химических элементов и образованию новых соединений.

Кроме того, изучение миграции химических элементов в термальных водах имеет практическое значение для разработки методов очистки и управления ресурсами. Понимание механизмов миграции может помочь в оценке риска загрязнения подземных вод и в разработке эффективных стратегий по охране окружающей среды.

Научные исследования в этой области проводятся как отечественными, так и зарубежными учеными, которые используют современные методы анализа и моделирования для изучения поведения химических элементов [2–22].

Изучению азотных термальных вод посвящено много работ [1, 23–41], но детальному рассмотрению форм миграции химических элементов в термах уделялось недостаточно внимания. Выявление форм миграции элементов является важнейшим звеном в понимании механизмов формирования терм и эволюции состава подземной гидросферы в целом [42].

Как известно, химические элементы могут находиться в растворе в форме собственных ионов и в виде сложных комплексных соединений. При этом основные формы миграции определяются содержанием рассматриваемого иона и геохимическими условиями среды (величинами pH, Eh, температура), а также активными концентрациями ионов-комплексообразователей. При этом достаточно качественных и доступных методов анализа, позволяющих исследовать в чистом виде формы миграции химических элементов, в настоящее время не существует, и единственным доступным средством их изучения является термодинамическое моделирование с помощью различных программ [6].

В этой связи целью настоящего исследования является определение основных форм миграции химических элементов в термальных водах центральной части Байкальской рифтовой зоны.

#### Методы исследования

В основу работы положены результаты гидрогеохимического опробования термальных вод, проведенного сотрудниками Томского филиала Института нефтегазовой геологии и геофизики (ТФ ИНГГ) СО РАН в 2024 г. Всего опробовано 15 термальных источников для определения химического, газового и изотопного состава. В полевых условиях измерялись температура, pH и Eh. Отбор проб для анализа химического состава вод производился в пластиковые бутылки объёмом 1 л, трижды промытые исследуемой водой. Анализ химического состава терм осуществлялся общепринятыми классическими химическими и инструментальными методами в аттестованной лаборатории геоэкологии и гидрогеохимии ИПРЭК СО РАН (г. Чита). Концентрации Ca<sup>2+</sup> и Mg<sup>2+</sup> были получены методом атомно-абсорбционной спектрометрии с атомизацией в пламенах «закись азота-ацетилен» и «воздух-ацетилен»); Na<sup>+</sup> и K<sup>+</sup> – методом пламенноэмиссионной спектрометрии. Титриметрическими методами определялись концентраций CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>−</sup>, Cl<sup>−</sup>, а также растворенного CO<sub>2</sub>. Содержания SO4<sup>2-</sup> измерялись турбидиметрическим методом. С применением потенциометрического метода определялись концентрации F<sup>-</sup>. Определение массовых концентраций кремния, общего фосфора, PO4<sup>3-</sup>, NO2<sup>-</sup>, NH4<sup>+</sup> осуществлялось фотометрическими методами. Изучение химического состава терм осуществлялось с применением атомноабсорбционного спектрофотометра SOLAAR M6 (Thermo Scientific, США), однолучевого спектрофотометра SPEKOL 1300 (Analytik Jena, Германия), анализатора жидкости PhotoLab Spektral (WTW, Германия) и анализатора жидкости Эксперт 001-3-0.1 (Эконикс-Эксперт, Россия). Содержания микроэлементов определены методом ICP-MS на квадрупольном масс-спектрометре X-series 2 (Thermo Scientific). Органический углерод Сорг определялся методом высокотемпературного каталитического серии окисления на анализаторе TOC-L SHIMADZU. Соотношение фульво- и гуминовых кислот (fulvic acids (FA), humic acids (HA)) определяли с преконцентрированием на смоле XAD-8, с дальнейшим подкислением элюата до pH=2, центрифугированием и последующим анализом Сорг. Микроэлементный анализ и определение общего органического углерода осуществлялись на кафедре радиохимии МГУ.

Формы миграции основных макрокомпонентов и значимых микрокомпонентов рассчитывались с использованием методов равновесной термодинамики в программном комплексе HydroGeo, разработанном М.Б. Букаты [3]. Для каждой пробы воды вводились данные по температуре, pH, Eh и количественному содержанию основных ионов (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>(CO<sub>2</sub>), SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Cl<sup>-</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Fe<sup>2+</sup>), а также NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>, Si и некоторых микроэлементов, концентрация которых в водах очень высокое (Sr, Al, Br, Li, Zn, Mn). В результате гидрогеохимических расчетов получаются действительные (а не валовые) концентрации компонентов в растворе из ионных ассоциатов и комплексных соединений, включенных в систему моделирования.

Методика расчетов комплексообразований изложена в [2, 4]. Комплексные соединения образуются при взаимодействии иона-комплексообразователя (Ме) и лигандов (А) по формуле:

$$MeA_m^{mk+n} = Me^{n+} + mA^{k-}$$
.

Характеристикой комплексного соединения служит константа устойчивости *K*<sub>v</sub>:

$$K_{y} = \frac{[MeA_{m}^{mk+n}]}{[Me^{n+}][A^{k-}]^{m}},$$

где  $[Me^{n^+}]$  – молярная концентрация элемента с зарядом  $n^+$  в незакомплексованной форме;  $[A^{k^-}]$  – молярная концентрация адденда A с зарядом  $k^-$ ;  $[MeA_m^{mk+n}]$  – молярная концентрация комплексного соединения, имеющего суммарный заряд mk+n; m – координационное число.

#### Объект исследования

Район исследований приурочен к центральной части Байкальской рифтовой зоны (БРЗ), которая относится к одному их крупнейших элементов земной коры – Центрально-Азиатскому подвижному поясу (рис. 1).



**Рис. 1.** Геологическая карта района работ с нанесением точек опробования из термальных источников на территории БРЗ (Составлена на базе [44])

Fig. 1. Geological map of the work area with sampling points from thermal springs on the territory of the Baikal Rift Zone (Compiled on the basis of [44])

На представленной геологической карте показаны породы, развитые на изучаемой территории, а также точки отбора термальных вод: 1 – Четвертичный период. Отложения ледниковых комплексов, аллювиальные, озерные, озерноаллювиальные, палюстринные, пролювиальные, делювиальные, солифлюкционные, элювиальные, коллювиальные, эоловые, оползневые, селевые и техногенные. Галечники, пески с прослоями глин, суглинков, алевриты, алевропески; 2 – Плиоценчетвертичный период. Базальты оливиновые, щелочно-оливиновые, трахибазальты, вулканогенноосадочные образования; 3 – Плиоцен-четвертичный период. Озерно-аллювиальные пески, галечники, аллювий, гравийники; 4 – Миоцен–плиоцен. Пески, глины, угли; 5 – Олигоцен–миоцен. Песчаники, пески с галькой, алевролиты и аргиллиты с прослоями бурых углей; 6 – Верхний меловой. Конгломераты, гравелиты, алевролиты, аргиллиты, хлидолиты, прослои бурых углей, песчаники, мергели, бурые угли, конглобрекчии, валунники, галечники; 7 – Нижний меловой. Конглобрекчии, конгломераты, хлидолиты, песчаники, гравелиты, алевролиты, аргиллиты, сланцы, мергели, известняки, туфы, туффиты трахириолитов, трахидацитов; 8 - Средний-верхний юрский. Трахиандезибазальты, трахибазальты, трахиты, трахидациты, перлиты, туффиты, конгломератобрекчии, конгломераты, гравелиты, песчаники, алевролиты, аргиллиты, туфотерригенные породы. Андезиты, андезибазальты, трахиты, сиенит-порфиры, риолиты, долериты; 9 -Нижний триасовый. Трахириолиты, трахириодациты, трахиандезибазальты, риолиты, перлиты, туфы, кластолавы, дайки риолитов, риодацитов, гранитпорфиров, сиенит-порфиры, базальты, трахибазальты; 10 - Средний каменноугольный. Гаргинский комплекс метаморфический – гнейсо-граниты, горизонты доломитов и известняков, теневые и послойные мигматиты, кристаллические сланцы; 11 – Девонский период. Полимиктовые и карбонатные конгломераты, конглобрекчии, песчаники, алевролиты, риолиты, дациты; 12 – Верхний кембрийский - нижний ордовикский. Пестроцветные конгломераты, гравелиты, песчаники, алевролиты, прослои известняков, лавобрекчии дацитов и андезитов; 13 - Нижний-средний кембрий. Сланцы серицит-хлорит-кварцевые, серицит-кварцевые, известняки, доломиты, метапесчаники, гравелиты, марганценосные кремнисто-карбонатные сланцы, песчаники, прослои алевролитов, конгломератов, известняков, гравелиты, филлитовидные сланцы, доломиты; 14 – Нижний кембрий. Доломиты, известняки, карбонатные конгломераты, конгломераты, прослои сланцев, песчаников, гравелитов и алевролитов; 15 – Верхнепротерозойский эон. Средние и кислые эффузивы, песчаники, алевролиты, туфы, туфоконгломераты; кварц-серицитовые сланцы, черные глинистые сланцы, известняки, прослои мраморов, гравелитов, конгломератобрекчий, яшмовидные породы; 16 – Нижнепротерозойский эон. Переслаивание битуминозных известняков, графитизированных мраморов и сланцев слюдистых, кварц-карбонатных, биотитхлоритовых, амфибол-биотитовых; гнейсы и сланцы; 17 – Верхнеархейский-нижнепротерозойский. Гнейсы амфиболовые. биотитовые пироксенамфиболовые, гранат-амфиболовые, гранатбиотитовые плагиогнейсы, кристаллические сланцы, амфиболиты, пироксеновые кристаллические сланцы с горизонтами графитизированных мраморов и линзами амфиболитов, мраморы с графитом, кальцифиры, линзы кварцитов и амфиболитов; 18-29 - Интрузивные породы; 30 - номер пробы и название термального источника.

Формирование Байкальской рифтовой зоны началось в период верхнего мела и продолжается по настоящее время. Развитие происходило в две стадии, по двум режимам растяжения литосферы, разделённым фазой сжатия и изменения поля тектонических напряжений. В настоящее время для территории характерно проявление неогенчетвертичного вулканизма [43].

В настоящей работе объектом исследования являются термальные источники центральной части БРЗ, большинство из которых приурочены в основном к Баргузинской впадине. Разгрузка термальных вод происходит в протерозойских и палеозойских интрузивных породах, которые представлены крупно- и среднезернистыми порфировидными, нередко гнейсовидными, биотитовыми, биотитроговообманковыми, роговообманковыми гранитами, граносиенитами, гранодиоритами, сиенитами и диоритами. Также встречаются гранитоидные разности архейского, протерозойского, палеозойского и мезокайнозойского этапов развития, которые представлены гнейсогранитами, гранитами, сиенитами, диоритами. Разности основного состава представлены габбровыми массивами, чаще всего выходящими на дневную поверхность в виде небольших штокообразных тел [1, 43].

Результаты анализа химического состава воды представлены в табл. 1, из которой видно, что исследуемые термы в основном являются ультрапресными, щелочными, с переменчивой окислительно-восстановительной обстановкой. Величина общей минерализации вод не превышает 1 г/л и варьирует от 273 до 941 мг/л. При этом величина рН составляет 8,14-9,43, за исключением одного родника (№ 7), где среда является близкой к нейтральной, pH составляет 7,4. По величине Eh термы характеризуются как восстановительной (Eh от -438 до -60 мВ), так и переменной окислительно-восстановительной обстановкой (Eh 57-113 мВ). Измеренная на поверхности температура терм составляет 19,8-75,6 °С. По химическому составу термы преимущественно относятся к SO<sub>4</sub>-Na типу, в меньшей степени к HCO<sub>3</sub>-SO<sub>4</sub>-Na, и лишь в единичном случае к SO<sub>4</sub>-Ca-Na типам.

Концентрации доминирующих анионов SO4<sup>2-</sup> и HCO<sub>3</sub><sup>-+</sup>CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> составляют соответственно 70-489 и 98-586 мг/л. Хлор-иона содержится несколько меньше - от 9,04 до 48,83 мг/л. Среди катионов преобладает Na<sup>+</sup>, концентрации которого изменяются от 77 до 263 мг/л. Содержания Ca<sup>2+</sup> (4,7-44,9 мг/л), Mg<sup>2+</sup> (0,01–0,93 мг/л) и К<sup>+</sup> (0,87–8,35 мг/л) достаточно низкие. Кроме этого, для исследуемых вод характерны повышенные концентрации фтора и кремния. Концентрации F составляют 3,4–19,9 мг/л, содержание SiO<sub>2</sub> находится в диапазоне 54-118 мг/л. Фосфатов содержится в небольших количествах, концентрации  $PO_4^{3-}$  варьируют от 0,01 до 0,07 мг/л. Содержание органического вещества не превышает 4 мг/л (С<sub>орг</sub> 0,05–3,94 мг/л), а соотношение ФК/ГК изменяется от 1,93 до 4,55. Что касается микроэлементов, то концентрации Li, Al, Zn, Br, Mn и Sr изменяются в пределах 1-2 порядков.

Tuble II Shehhea	reompe	Sition (	<i>y</i> ene ei	ier mai	maters	oj tile b	112 47 01	к, ш <u></u> , ц	, <i>m</i> g/ 1						
Элемент/Element	3	10	11	12	1	2	4	5	6	7	8	9	13	14	15
TDS	404	350	309	278	547	374	433	683	338	614	345	275	334	322	942
рН	9,7	9,7	9,6	9,7	9,3	8,7	9,4	8,2	9,4	7,4	9,1	8,9	9,3	9,3	8,1
Eh, мB/mV	-438	-392	-390	-334	-60	78	-438	96	57	135	80	86	-386	-386	113
T, °C	41,8	43,8	47,3	54,1	56,0	41,0	45,8	71,8	28,0	19,8	70,6	29,1	53,0	75,6	74,0
Химический тип Chemical type		HCO <sub>3</sub> -S	SO4-Na							SO4-Na					
HCO3-	45,1	22,0	24,4	27,8	7,3	38,1	76,1	90,5	47,8	51,2	49,5	53,9	58,8	67,7	97,1
CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	52,1	49,2	38,6	39,1	14,4	3,1	42,7	-	24,2	-	48,5	10,8	28,3	29,5	-
SO4 <sup>2-</sup>	126	131	116	69,7	332	195	143	343	135	364	150	106	110	83,4	489
Cl-	25,3	16,2	11,4	14,9	9,0	16,3	22,6	30,8	15,1	15,8	14,0	10,6	16,3	22,6	48,8
PO4 <sup>3-</sup>	0,03	0,03	0,03	0,02	0,01	0,06	0,07	0,01	0,03	0,03	0,02	0,04	0,03	0,03	0,02
Ca <sup>2+</sup>	4,9	5,0	5,2	4,7	22,6	12,7	4,7	15,6	5,8	44,9	6,6	6,5	5,7	11,9	24,1
Mg <sup>2+</sup>	0,01	0,07	0,03	0,01	0,03	0,47	0,04	0,12	0,03	0,93	0,01	0,43	0,05	0,02	0,04
Na+	126	108	96,2	96,2	155	97,5	122	184	97,9	128	95,8	7,5	98,2	82,9	263
K+	1,39	1,44	1,11	0,87	2,98	2,76	1,29	7,83	1,79	4,49	2,85	2,46	2,59	2,43	8,35
Fe	8,0	44,7	1,7	8,4	29,4	179,4	16,6	74,3	4,8	57,9	2,4	13,4	10,8	10,2	18,1
SiO <sub>2</sub>	112	97,3	91,1	87,1	79,0	80,9	111	103	69,6	53,7	118	96,2	116	98,2	91,1
Copr/DOC	3,94	0,39	0,88	0,09	0,05	1,41	2,19	0,17	0,14	0,12	0,07	0,19	0,84	0,09	0,15
ΦΚ/ΓΚ/FA/HA	2,91	3,54	1,93	-	-	4,55	3,74	2,12	-	-	-	3,81	-	-	-
F-	16,4	13,1	15,1	19,9	3,4	6,4	10,6	10,8	9,3	3,4	7,5	5,9	11,5	10,1	11,5
Li*	52,1	66,9	99,4	97,9	39,4	130	19,1	179	67,6	115	122	95,8	76,1	73,9	1279
Al*	30,5	60,5	24,1	25,8	5,6	26,7	33,1	15,4	3,8	2,4	3,5	11,9	20,1	51,9	12,6
Zn*	0,50	3,91	3,33	1,37	1,13	0,44	6,18	2,14	0,93	3,17	1,73	3,29	6,53	5,34	2,86
Br*	82,8	38,8	27,2	8,2	39,2	29,5	57,5	77,6	35,2	19,9	46,6	41,5	33,9	38,5	85,5
Mn*	1,54	1,11	1,72	0,36	0,70	22,0	1,93	2,24	1,54	1,42	0,04	0,27	2,41	0,43	18,1
Sr*	113	244	116	171	542	297	26,7	1285	107	1567	171	196	327	294	2742

**Таблица 1.** Химический состав термальных вод БРЗ, мг/л/\*мкг/л **Table 1.** Chemical composition of the thermal waters of the BRZ area. ma/L/\*ua/L

На фоне рассматриваемых микроэлементов в значительных концентрациях содержатся Li (19,06–1279,07 мкг/л) и Sr (26,7–2741,81 мкг/л). Меньше накапливается Al, Zn, Br и Mn, содержание которых составляет 2,41–60,45; 0,44–6,53; 8,24–85,45 и 0,04–22 мкг/л, соответственно.

#### Результаты исследования и их обсуждение

В рамках настоящего исследования проведены расчеты форм миграции основных катионов и части микрокомпонентов для оценки влияния каждого лиганда на миграцию в воде, а следовательно, и на формирование химического состава вод. Результаты проведенных расчетов представлены в табл. 2, в которой показаны соединения в количествах более 0,01 % от валового содержания каждого компонента.

Согласно расчётам, основные катионы мигрируют в простой ионной форме. В большинстве проб доля Na<sup>+</sup> составляет более 90 % от валовых содержаний растворенных форм натрия (за исключением проб 5 и 15 (88 и 79 % соответственно)), доля K<sup>+</sup> – более 80 % от валовых содержаний растворенных форм для калия (исключение проба 15 – 79 %). Содержание ионной формы Ca<sup>2+</sup> значительно меньше – в среднем 30–50 %, а Mg<sup>2+</sup> в большинстве проб около 20–25 % за исключением проб 3 и 4. Меньше всех образуют соединения натрий, калий, алюминий, марганец, бром, кремний, стронций, больше всех – кальций, магний, литий, фтор, железо (рис. 2).

Наибольший вклад в комплексообразование, помимо большой доли ионной формы для кальция, магния, лития и особенно натрия, калия и стронция (до порядка 90 %), вносят сульфатные комплексы  $CaSO_4^0$ ,  $(CaSO_4)_2^{2-}$ ,  $MgSO_4^0$ ,  $(MgSO_4)_2^{2-}$ ,  $(NaSO_4)^-$ ,  $(KSO_4)^-$ ,  $(LiSO_4)^-$ ,  $SrSO_4^0$ . Это связано с высокими концентрациями в водах сульфат-иона (от 83,4 до 488,6 мг/л).

Некоторые элементы, такие как железо, марганец и литий, образуют значимое количество карбонатных комплексов (FeCO<sub>3</sub><sup>0</sup>, (FeHCO<sub>3</sub>)<sup>-</sup>, MnCO<sub>3</sub>, Li<sub>2</sub>CO<sub>3</sub><sup>0</sup>). Концентрации карбонатных комплексов основных катионов (Ca, Mg, Na, K) и ряда других микрокомпонентов в основном менее 1 % (в единичных случаях 2-3 %) или отсутствуют (табл. 2). Согласно [32], в холодных природных водах макрокомпоненты не образуют карбонатные соединения ввиду околонейтральной среды (рН 7,5, для MgCO<sub>3</sub> >8,0), т. к. в этих условиях количество HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> недостаточное для формирования комплексов [32]. Для исследуемых вод характерна щелочная среда, однако гидрокарбонатных форм практически нет. Это объясняется тем, что растворимость карбонатов с повышением температуры уменьшается [4, 32]. Именно поэтому в изученных термальных водах валовые содержания гидрокарбонатных форм практически отсутствуют или низкие.

**Таблица 2.** Формы миграций химических элементов термальных вод Байкальской рифтовой зоны, % от валовых содержаний растворенных форм элемента

**Table 2.**Forms of migration of chemical elements of thermal waters of the Baikal Rift Zone, % of the gross dissolved forms of<br/>the element.

0	Формы															
Элемент Flements	миграций Forms of	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Liements	migration															
	Ca <sup>2+</sup>	49,1	39,6	98,0	79,7	41,7	48,9	30,7	45,5	42,9	45,1	45,8	45,9	46,1	47,2	28,9
	CaHCO <sub>3</sub> 0	-	-	-	0,47	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	CaCO3	-	-	-	18,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	(Ca(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ) <sup>2-</sup>	-	-	-	0,54	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ca <sup>2+</sup>	$Ca(SO_4)_{2^{2^-}}$	8,8	21,9	0,0	0.1	19,4	11,8	41,1	8,6	17,2	14,5	11,5	10,6	11,0	7,6	46,4
		41,9	38,5	1,4	0,1	38,8	39,2	28,2	45,5	39,9	40,1	42,4	42,9	42,7	44,3	24,7
	CaE+	0.03	0.04	0.32	0.19	0.01	0,01	0.01	0.08	0.04	0,01	0.13	0.18	0,01	0,02	0.02
	CaOH+	0.18	0.01	0.26	0,19	0.02	0.02	0,01	0.34	0.01	0.14	0.18	0.34	0.13	0.75	0.01
	Mg <sup>2+</sup>	27,2	20,1	92,7	84,6	15,5	31,4	18,5	22,7	25,8	24,5	25,2	24,3	24,7	23,4	6,3
	MgCO <sub>3</sub> <sup>0</sup>	-	-	-	10,3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	(Mg(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ) <sup>2-</sup>	-	-	-	0,66	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Mg <sup>2+</sup>	MgSO <sub>4</sub> <sup>0</sup>	44,4	37,7	2,57	0,26	27,0	48,3	32,3	42,6	46,2	42,0	44,9	43,5	43,9	41,0	10,0
0	(Mg(SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> ) <sup>2-</sup>	27,3	42,1	0.06	0.05	57,3	19,7	49,2	33,2	27,8	32,2	28,4	29,8	30,4	32,5	83,7
	MgCl <sup>o</sup>	0,01	0.1	0,06	0,05	0,01	0,01	0.04	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0.02
	MgOH+	1.01	0.05	3.11	2.4	0.07	0.23	0,04	1.38	0.06	0.94	1.16	1.85	0.73	2.84	0.02
	Na <sup>+</sup>	93,5	91,3	99,9	99,4	87,7	95,4	91,5	91,9	94,1	92,9	93,3	92,8	92,9	92,0	79,0
	Na(CO <sub>3</sub> )-	-	-	-	0,29	-	-	-	_	-	-	-	-	_	-	-
Na+	(NaSO4)-	6,52	8,64	0,1	0,01	12,2	4,56	8,46	8,04	5,93	7,06	6,68	7,12	7,1	7,91	21
Na	NaCl <sup>o</sup>	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02
	NaF <sup>0</sup>	-	-	0,01	0,01	0,01	0,01	-	0,01	-	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	-
	NaOH-	0,01	-	0,01	0,01	- 01.4	- 01.2	-	0,02	-	0,01	0,02	0,03	0,01	0,03	-
K+	(K201)- V.	89,5	85,4	99,8	99,9	81,4	91,3	83,4	87,5	89,0	88,1 110	88,9	88,5	88,5	87,7	69,7 30.3
	FeCO <sub>2</sub> <sup>0</sup>	- 10,5	-	- 0,2	37.7	- 10,0	- 0,7	- 10,0	12,0	- 11,0	-	-	-	- 11,5	12,3	
	FeSO <sub>4</sub> <sup>0</sup>	-	0,02	0,16	0,01	-	-	96,9	-	0,01	5,46	4,61	0,21	10,8	0,32	-
	FeF+	-	-	0,3	0,17	-	-	0,34	-	-	0,11	0,11	0,01	0,19	-	-
	(Fe(OH)₄)-	98,4	89,6	3,7	1,3	89,3	96,2	0,3	98,5	89,7	35,8	42,1	95,7	18,7	93,4	91,0
Fe <sup>2+,3+</sup>	(Fe(OH) <sub>2</sub> )+	-	0,02	-	-	-	-	0,17	-	0,02	-	-	-	-	-	0,02
	Fe(OH) <sub>3</sub> 0	1,58	10,4	0,05	0,02	10,7	3,79	1,46	1,46	10,3	0,34	0,42	0,7	0,34	0,78	9,03
	FeOH+	-	0,01	95,0	60,4	-	-	0,88	-	0,01	5/,/	52,2	3,36	69,4	5,33	-
		_	_	0,00	0,35	_	-	_	_	_	0,51	0,54	0,00	0,49	0,19	_
	Al(OH) <sub>3</sub> 0	0.04	0.3	0.03	0.02	0.29	0.09	9.72	0.04	0.27	0.03	0.03	0.02	0.05	0.02	0.24
Al <sup>3+</sup>	(AlO <sub>2</sub> ) <sup>-</sup>	99,9	99,7	99,9	99,9	99,9	99,9	90,1	99,9	99,7	99,9	99,9	99,9	99,9	99,9	99,8
Mm <sup>3+</sup>	(MnHCO <sub>3</sub> )+	0,12	1,1	0,10	0,14	0,98	0,33	37,0	0,09	1,00	0,08	0,08	0,06	0,14	0,05	1,12
MIII	MnCO <sub>3</sub>	99,88	98,9	99,9	99,9	99,0	99,6	63,0	99,9	99,0	99,9	99,9	99,9	99,9	99,9	98,9
	Li+	53,0	69,6	20,4	0,20	53,3	34,7	47,9	52,4	44,8	34,3	48,5	46,4	33,4	29,4	68,8
T **	$Li_2CO_3^0$	39,7	11,5	79,5	99,8	36,2	58,5	28,7	40,9	43,9	58,7	43,0	46,2	61,1	67,3	6,6
Ll⁺	$(LiPO_4)^2$	0,01	-	0,01		10.5	6.83	23.4	0,01	11.2	6.95	0,01	0,01	5.43	2 20	- 24.6
	LiOH	0.05	0.01	0,00		0.01	0,03	23,4	0,01	11,5	0,93	0,47	0.09	0.03	0.07	0.01
	Sr <sup>2+</sup>	84.3	84.0	99.6	93.4	80.5	86.7	84.8	79.4	84.9	84.9	84.1	83.2	83.6	79.0	81.2
	(SrHCO <sub>3</sub> )+	-	-	-	0,92	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>S</b> r <sup>2+</sup>	SrCO <sub>3</sub> 0	-	-	-	5,48	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5121	SrSO <sub>4</sub> <sup>0</sup>	15,6	16,0	0,28	0,03	19,5	13,3	15,3	20,4	15,1	14,9	15,7	16,5	16,3	20,5	18,8
	SrF+	0,01	0,02	0,07	0,05	0,02	0,04	0,01	0,03	0,02	0,04	0,06	0,07	0,04	0,04	0,01
	SrOH+	0,11	0,01	0,08	0,07	0,02	0,01	-	0,21	-	0,09	0,11	0,21	0,08	0,46	0,01
	F- CwE+	97,5	99,0	99,1	99,3	96,6	99,4	83,4	99,1	99,1	98,4	99,3	99,2	98,3	98,5	96,5
F-	51'F* FoF+	2,19	0,87	0,51	0,13	3,10	0,44	2,89	0,/3	0,72	0,84	0,40	0,68	1,28	1,24	3,32
L.	CaF+	035	0.01	0,19	0,41	- 0.52	0.09	0.25	011	0.08	0,50	0,14	0,01	0,20	0,01	0.1
	NaF <sup>+</sup>	0.01	-	0.1	0.1	0.12	0.07		0.08	0.05	0.07	0.05	0.07	0.07	0.07	0.11
Br <sup>5+,7+</sup>	BrO-	0,01	1	U) I	U) 1	,- <u>-</u>	0,07	1	100	0,00	5,07	0,00	5,07	5,07	5,07	<i>,,,</i> ,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,
Si <sup>4+</sup>	(HSi <sub>2</sub> O <sub>6</sub> ) <sup>3-</sup>								100							



Рис. 2. Формы нахождения некоторых химических элементов

Fig. 2. Forms of occurrence of studied chemical elements

Как показано ранее, доминирующую роль играют сульфатные формы.

Натрий и калий практически не образуют комплексных соединений, однако в незначительных количествах присутствуют их сульфатные формы –  $(NaSO_4)^-$  и KSO\_4 – в среднем в значениях до 8–12 % для натрия и до 11–18 % для калия (исключение проба 15 – 30 %). В некоторых случаях, где повышенные концентрации Cl, образуется форма NaCl<sup>0</sup>, составляющая менее 1 %. Содержание гидрокарбонатной формы натрия незначительно, а гидрокарбонатная форма калия не фиксируется в 14 пробах из 15 (рис. 3).



**Рис. 3.** Формы нахождения Na и K (средние значения, %) **Fig. 3.** Forms of occurrence of Na и K (average values, %)

При детальном рассмотрении миграции железа установлено наибольшее количество образованных форм. Содержания в термальных водах достаточно высоки и фиксируются от 2 до 20 мг/л, реже 60 мг/л. Единично отмечена максимальная концентрация Fe в пробе № 2 (179,4 мг/л) (табл. 1).

Насыщение воды кислородом приводит к быстрому окислению  $Fe^{2+}$  до  $Fe^{3+}$ , поэтому в водных растворах чаще всего встречаются соединения железа (III) как термодинамически более устойчивые [4]. Fe<sup>3+</sup> характеризуется способностью к образованию устойчивых комплексных соединений не только с органическими веществами гумусового ряда (фульфо- и гуминовыми кислотами), но и с некоторыми неорганическими анионами, особенно с ОН-. Как видно из табл. 1, установленные концентрации фульво-гуминовых кислот (ФК и ГК) незначительны. При изучении основных форм миграции Fe<sup>3+</sup> было выявлено, что в большинстве опробованных источников от 35-42 до 90 % от валового содержания комплексов железо присутствует в следующих гидроокисных формах: (Fe(OH)<sub>4</sub>)<sup>-</sup>,  $FeOH^+$ ,  $Fe(OH)_3$  (табл. 2, рис. 2). Соотношение между этими формами зависит от pH и Eh воды, а также от общей концентрации железа. При значениях рН, характерных для исследуемых вод, доминирует форма (Fe(OH)<sub>4</sub>)<sup>-</sup> (до 90 %) и FeOH<sup>+</sup> (50–69 %). Их валовые содержания растут с увеличением рН вод, а вот содержания остальных форм снижаются

(рис. 2). При переходе из окислительной среды в восстановительную происходит увеличение содержаний всех выявленных форм железа, но в разной степени.

В [9] авторы отмечают, что в водах с высоким содержанием фульвосоединений железа практически отсутствуют его гидрооксиды, и наоборот либо все эти комплексы присутствуют в минимальных концентрациях или отсутствуют вовсе. Именно эту картину при низких концентрациях ФК и ГК (табл. 1) мы и наблюдаем в термальных водах БРЗ. Кроме этого, при высоких значениях рН (в данном случае >8) концентрация иона ОН<sup>-</sup> высокая и она вытесняет анионы фульвокислот из координационной сферы комплексных соединений [42].

Анализ миграции микрокомпонентов также позволяет выделить некоторые их особенности. Литий мигрирует в основном в ионной и карбонатной форме, а алюминий, марганец, бром, кремний – в оксидных и гидрооксидных формах (табл. 2).

Отдельно выделяется Sr, концентрации которого достигают 300–542 мгк/л, а в трех пробах – № 8, 10 и 15, соответственно, 1285, 1567 и 2742 мкг/л. Установлено, что последние характеризуются нейтральной и слабощелочной средой (рН 7,4-8,2), в то время как во всех остальных источниках щелочные условия рН 8,7-9,7. Действительно, стронций в термальных водах может присутствовать в различных формах и концентрациях, в зависимости от разных условий - вмещающих пород, температуры и, конечно же, рН. Если в районе распространения терм присутствуют Sr-содержащие минералы (стронциевые карбонаты или сульфаты), его концентрация может быть выше. Изучение минералогического состава водовмещающих пород не входит в задачи данной работы, поэтому в этой статье не рассматривается и является следующим этапом. Другим фактором, от которого зависит концентрация и формы миграции стронция в водах, является рН. В кислой среде стронций чаще находится в ионной форме  $Sr^{2+}$ , которая более растворима. Валовые содержания ионной формы стронция в термах БРЗ составляют от 79,0 до 99,5 % (табл. 2). Кроме этого, в зависимости от рН и температуры Sr может образовывать комплексы с различными анионами, что также влияет на его растворимость и миграцию в воде. В условиях высоких температур терм растворимость некоторых минералов может увеличиваться, что приводит к большей концентрации стронция [4]. Вторая по значимости в процентном соотношении форма стронция в термах БРЗ является SrSO<sub>4</sub>, составляющая от 13 до 20 %. Как упомянуто выше, сульфатная форма доминирует среди остальных форм. Содержание Sr также может зависеть от наличия других элементов и соединений в воде, таких как кальций, магний и карбонаты. Например, конкуренция за растворимость между Sr и Ca может влиять на концентрацию первого в термальных водах. Стоит также не забывать, что в некоторых термальных источниках могут присутствовать микроорганизмы, которые способны влиять на химический состав воды, кислотно-щелочной баланс и в конечном итоге содержание стронция [45, 46].

Содержание и формы миграции алюминия в термальных водах также зависят от рН и окислительно-восстановительного потенциала (Eh). Так, до 99 % валовых концентраций алюминия содержится в виде алюмината ((AlO<sub>2</sub>)<sup>-</sup>), которые могут участвовать в различных реакциях, включая реакции с кислотами и основаниями. В кислых условиях алюминий может существовать в растворимой форме, как Al<sup>3+</sup>. Опробованные нами воды имеют в основном щелочной состав, реже слабощелочной (табл. 1). По результатам проведенных термодинамических расчетов алюминий в ионной форме нами не установлен. Щелочная среда, напротив, является благоприятной для образования алюминат-иона, когда алюминий находится в более высоком окислительном состоянии. Как правило, (AlO<sub>2</sub>)<sup>-</sup> является продуктом растворения гидроксид алюминия  $(Al(OH)_3)$  [33]

#### $Al(OH)_3+OH^-\rightarrow AlO_2^-+3H_2O.$

Согласно литературным данным в нейтральных и щелочных условиях (рН выше 6-7) алюминий начинает формировать нерастворимые гидроксиды, такие как Al(OH)<sub>3</sub>, что приводит к снижению его растворимости и концентрации в воде [33]. Расчетные содержания (Al(OH)<sub>3</sub>) в водах составляют десятые и сотые проценты от валовых концентраций форм Al, что является весьма характерным для слабощелочных и щелочных терм. В окислительных условиях Al может быть более устойчивым в водорастворимой форме. Однако окислительные условия могут способствовать образованию различных оксидов и гидроксидов алюминия, что также может снижать его концентрацию в растворе. В восстановительных условиях возможно образование нерастворимых форм алюминия, что может приводить к его осаждению. Это может уменьшить содержание Al в термальных водах.

Марганец в термальных водах может играть важную роль в различных геохимических и биогеохимических процессах. В исследуемых водах от 63 до 99 % валового содержания марганца присутствует в форме MnCO<sub>3</sub> (табл. 2). На растворимость марганца в термальных водах часто влияют высокие температуры и изменяющиеся значения pH. При высоких температурах и низких значениях pH Mn может существовать в растворенной форме, что увеличивает его доступность для биологических процессов. В термальных источниках происходят окислительно-восстановительные реакции, в которых марганец может выступать как окислитель или восстановитель. В зависимости от условий Мп переходит между различными валентными состояниями (например,  $Mn^{2+}$  в составе подземных вод БРЗ и  $Mn^{4+}$ ). Кроме этого, Мп является важным микроэлементом для многих организмов, включая бактерии и водоросли. В термальных водах Мп способствует росту определенных микробных сообществ, которые используют Мп в своих метаболических процессах, что приводит к снижению концентрации Mn в воде [47].

Что касается фтора, то по результатам термодинамических расчетов ионная форма F составляет 83–99 % валовых содержаний. Фторид-ион растворяется в воде и может быть результатом диссоциации фторсодержащих минералов. В зависимости от условий (например, pH и концентрации других ионов) фтор может образовывать комплексы с металлами, такими как алюминий, железо и другие. Эти комплексы могут влиять на мобильность и биодоступность фтора. Однако валовое содержание этих форм на столько незначительно (десятые доли процентов), что их влиянием можно пренебречь.

Бром в термальных водах может присутствовать в различных формах, аналогично фтору. Чаще всего это ионная форма, однако по результатам наших термодинамических расчетов установлено, что Br в исследованных термах встречается в виде BrO-(100 % валового содержания), который образуется в результате окислительных процессов, когда бромидные ионы взаимодействуют с кислородом или другими окислителями в воде. Гипобромит (BrO<sup>-</sup>) и другие оксиды брома могут образовываться в присутствии окислителей. Это может происходить, например, в результате взаимодействия термальных вод с атмосферным кислородом или другими химическими веществами. В связи с тем, что все опробованные нами термальные источники являются естественными выходами из горных пород, естественное взаимодействие подземных вод с атмосферным воздухом неизбежно. Кроме этого, оксиды брома, как правило, менее стабильны, чем бромиды, и могут быстро реагировать с другими веществами в воде, что затрудняет их обнаружение и изучение [4].

Содержание кремния в изученных водах доминирует (100 %) в виде ионного соединения ( $HSi_2O_6$ )<sup>3-</sup>, известного как гидросиликат. Содержание кремния в других формах присутствует в незначительных количествах и не играет весомой роли при расчете их валовых концентраций. В термальных водах ( $HSi_2O_6$ )<sup>3-</sup> может варьироваться в зависимости от геологических условий, температуры и химического состава воды. Гидросиликаты являются важными компонентами в термальных источниках, так как они могут влиять на минерализацию воды и образовывать различные осадки. Кроме этого, высокое содержание кремния часто связано с процессами выветривания силикатных минералов, а также с взаимодействием горячей воды с горными породами. Высокие температуры способствуют растворению кремния, что может приводить к образованию различных силикатных и гидросиликатных форм. Более подробно разобраться в этом вопросе мы планируем на следующем этапе наших работ.

#### Заключение

В центральной части Байкальской рифтовой зоны сформировались благоприятные геологические условия для разгрузки термальных вод на поверхность. Это связано в основном с широким распространением разрывных нарушений сбросового типа. В пределах рифтовой зоны формируются термальные воды в основном сульфатного натриевого и сульфатно-гидрокарбонатного натриевого типа.

Расчеты форм миграций основных ионов и части микрокомпонентов в термальных водах Байкальской рифтовой зоны показали следующие результаты:

 Среди основных катионов натрий (Na<sup>+</sup>) и калий (K<sup>+</sup>) в основном мигрируют в простой ионной форме, составляя более 90 % от валового содержания. Для  $Ca^{2+}$  и  $Mg^{2+}$  содержание ионной формы значительно ниже (30–50 и 20–25 % соответственно).

- 2. В результате проведенных исследований установлено, что в термальных водах доминируют сульфатные формы. Наибольшее количество сульфатных комплексов образуют кальций, магний, литий, натрий и калий, что связано с высокой концентрацией сульфат-иона в водах. Некоторые элементы (железо, марганец, литий) образуют карбонатные комплексы, однако для основных катионов и многих микрокомпонентов концентрации карбонатных форм очень низкие или отсутствуют ввиду особенностей среды.
- Несмотря на щелочную среду термальных вод, карбонатные формы в воде практически отсутствуют вследствие уменьшения растворимости карбонатов при повышении температуры.

Проведенные исследования подчеркивают комплексность распределения химических элементов в термальных водах, а также важность учета различных факторов при изучении их состава. Это открывает возможности для дальнейших исследований, включая оценку степени равновесия терм с минералами вмещающих пород, изучение процессов перераспределения химических элементов в системе вода-порода и выявление процессов и механизмов формирования состава терм в целом.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Гидрогеохимические особенности состава азотных терм Байкальской рифтовой зоны / А.М. Плюснин, Л.В. Замана, С.Л. Шварцев, О.Г. Токаренко, М.К. Чернявский // Геология и геофизика. 2013. Т. 54. № 5. С. 647–664.
- 2. Гаррельс Р.М. Растворы, минералы, равновесия. М.: Изд-во «Мир», 1968. 368 с.
- 3. Букаты М.Б. Рекламно-техническое описание программного комплекса HydroGeo. Номер гос. регистрации алгоритмов и программ во Всероссийском научно-техническом информационном центре (ВНТИЦ) № 50200500605. М.: ВНТИЦ, 2005. 7 с.
- 4. Крайнов С.Р., Рыженко Б.Н., Швец В.М. Геохимия подземных вод. Теоретические, прикладные и экологические аспекты. М.: Изд-во ЦентрЛитНефтеГаз, 2012. 672 с.
- 5. Липатникова О.А., Гричук Д.В. Термодинамическое моделирование форм нахождения тяжелых металлов в донных отложениях на примере Иваньковского водохранилища // Вестник Московского Университета Сер. 4. Геология. 2011. № 2. С. 5–59.
- 6. Никитенков А.Н., Новиков Д.А., Коренева Т.В. Формы миграции химических элементов в радоновых водах юга Сибири // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. 2023. № 2 (54). С. 81–90.
- 7. Сидкина Е.С., Торопов А.С., Конышев А.А. Геохимические особенности природных вод карьеров строительного камня Питкярантского района (Карелия) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2023. Т. 334. № 4. С. 7–21. DOI: 10.18799/24131830/2023/4/3954.
- 8. Колубаева Ю.В. Формы миграции химических элементов в водах северной части Колывань-Томской складчатой зоны // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2013. Т. 322. № 1. С. 136–141.
- Лепокурова О.Е., Трифонов Н.С., Домрочева Е.В. Миграционные формы основных ионов в подземных водах угленосных отложений Кузбасса с акцентом на соединения с гумусовыми кислотами (по результатам моделирования) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333. – № 3. – С. 76–89. DOI: 10.18799/24131830/2022/3/3464.
- A physicochemical model of metal-humate interactions / N.D. Bryan, D.M. Jones, M. Appleton, F.R. Livens, M.N. Jones, P. Warwick, S. King, A. Hall // The Journal of Physical Chemistry. – 2000. – Vol. 2. – P. 1291–1300.
- 11. Effect of kinetics of complexation by humic acid on toxicity of copper to Ceriodaphnia Dubia / H. Ma, S.D. Kim, D.K. Cha, H.E. Allen // Environmental Toxicology and Chemistry. 1999. Vol. 18. № 5. P. 828–837.
- 12. Xue H. Sigg, L. Comparison of the complexation of Cu and Cd by humic or fulvic acids and by ligands observed in lake waters // Aquatic Geochemistry. 1999. Vol. 5. P. 313–335.
- Thermodynamic study of the complexation of humic acid by calorimetry / S. Kimuro, A. Kirishima, Y. Kitatsuji, K. Miyakawa, D. Akiyama, N. Sato // Journal of chemical thermodynamics. – 2019. – Vol. 132. – P. 352–362.

- Lenhart J.J., Cabaniss S.E., MacCarthy P. Uranium(VI) complexation with citric, humic and fulvic acids // Radiochimica Acta. 2000. – Vol. 88. – P. 345–353.
- 15. Дину М.И., Шкинев В.М. Комплексообразование ионов металлов с органическими веществами гумусовой природы: методы исследования и структурные особенности лигандов, распределение элементов по формам // Геохимия. – 2020. – Т. 65. – № 2. – С. 165–177.
- 16. Mechanism and multi-step kinetic modelling of Cr(VI) adsorption, reduction and complexation by humic acid, humin and kerogen from different sources / S. Barnie, J. Zhang, P. Obeng, A. Duncan, C. Adenutsi, L. Xu, H. Chen // Environmental science and pollution research. 2021. № 28 (29). P. 38985–39000. DOI: 10.1007/s11356-021-13519-z.
- 17. Abualhaija M.M., Whitby H., Constant M.G. Competition between copper and iron for humic ligands inestuarine waters // Marine Chemistry. - 2015. - Vol. 172. - P. 46-56. DOI: 10.1016/j.marchem.2015.03.010.
- Impact of competitive Fe(III) ion on the complexation of humic acid and toxic metal ions / Y. Yamamoto, F. Kita, N. Isono, S. Imai // The Japan Society for Analitical Chemistry. – 2017. – Vol. 66. – № 12. – P. 875–883.
- Insight into complexation of Cu(II) to hyperthermophilic compost-derived humic acids by EEM-PARAFAC combined with heterospectral two dimensional correlation analyses / J. Tang, L. Zhuang, Z. Yu, X. Liu, Y. Wang, P. Wen, S. Zhou // Science of the Total Environment. – 2019. – Vol. 656. – P. 29–38.
- 20. Cherkasova E., Konyshev A., Soldatova E. Metal speciation in water of the flooded mine «Arsenic» (Karelia, Russia): equilibrium-kinetic modeling with a focus on the influence of humic substances // Aquatic Geochemistry. 2021. Vol. 27. № 2. P. 141–158.
- 21. Лепокурова О.Е., Домрочева Е.В. Элементный состав природных вод и вмещающих отложений Кузбасса с оценкой водной миграции (на примере Нарыкско-Осташкинской площади) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2021. Т. 332. № 2. С. 200–213. DOI: 10.18799/24131830/2021/2/3056.
- 22. Малова А.И., Сидкина Е.С., Рыженко Б.Н. Модель месторождения алмазов им. М.В. Ломоносова как системы «водапорода»: формы миграции, насыщенность подземных вод относительно породообразующих и рудных минералов, экологическая оценка качества вод // Геохимия. – 2017. – № 12. – С. 1128–1140.
- 23. Борисенко И.М., Замана Л.В. Минеральные воды Бурятской АССР. Улан-Удэ: Бурят. кн. Изд-во, 1978. 162 с.
- 24. Michard G. Behavior of major elements and some trace elements (Li, Rb, Cs, Sr, Fe, Mn, W, F) in deep hot water from granitic areas // Chemical Geology. 1990. Vol. 89. P. 117–134. DOI: 10.1016/0009-2541(90)90062-C.
- Изотопы гелия во флюидах Байкальской рифтовой зоны / Б.Г. Поляк, Э.М. Прасолов, И.Н. Толстихин, С.В. Козловцева, В.И. Кононов, М.Д. Хуторской // Известия академии наук СССР. – 1992. – Т. 10. – С. 18–33.
- 26. Origin and circulation patterns of deep and shallow hydrothermal fluids in the Mt. Amiata geothermal region (central Italy) / A. Minissale, G. Magro, F. Tassi, C. Verrucchi // Proc. 8th International Symposium on Water Rock Interaction / Eds. Y. Kharaka, O.V. Chudaev. Rotterdam: Balkema, 1995. P. 523–528.
- 27. Yum B.W. Movement and hydrogeochemistry of thermal waters in granite at Gosuns, Republic of Korea // Proc. 8th International Symposium on Water-Rock Interaction / Eds. Y. Kharaka, O.V. Chudaev. Rotterdam: Balkema, 1995. P. 401–404.
- 28. Павлов С.Х., Чудненко К.В. Формирование азотных терм: моделирование физико-химических взаимодействий в системе «вода-порода» // Геохимия. 2013. Т. 12. С. 1090–1104.
- 29. Geochemistry of the thermal waters in Jiangxi Province, China / S.L. Shvartsev, Z. Sun, S.V. Borzenko, B. Gao, O.G. Tokarenko, E.V. Zippa // Applied Geochemistry. 2018. Vol. 96. P. 113–130. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2018.06.010.
- 30. Pasvanoğlu S., Çelik M. A conceptual model for groundwater flow and geochemical evolution of thermal fluids at the Kızılcahamam geothermal area, Galatian volcanic Province // Geothermics. – 2018. – Vol. 71. – P. 88–107. DOI: 10.1016/j.geothermics.2017.08.012
- 31. Origin, evolution and geothermometry of the thermal waters in the Gölemezli Geothermal Field, Denizli Basin (SW Anatolia, Turkey) / H. Alçiçek, A. Bülbül, A. Brogi, D. Liotta, G. Ruggieri, E. Capezzuoli, M. Meccheri, İ. Yavuzer, M.C. Alçiçek // Journal of Volcanology and Geothermal Resources. 2018. Vol. 349. P. 1–30. DOI: 10.1016/j.jvolgeores.2017.07.021.
- 32. Lepokurova O.E. Sodium-bicarbonate groundwaters in southeastern West Siberia, Russia: compositions, types, and formation conditions // Applied Geochemistry. 2020. Vol. 116. 104579. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2020.104579.
- 33. De Broe M.E., Coburn J.W. Aluminum and renal failure // Developments in Nephrology. Dordrecht: Kluwer Acad Publ, 1990. P. 99–378. DOI: 10.1007/978-94-009-1868-9.
- 34. Лаврушин В.Ю. Подземные флюиды Большого Кавказа и его обрамления // Труды Геологического института. М.: ГЕОС, 2012. – 348 с.
- 35. Шварцев С.Л., Зиппа Е.В., Борзенко С.В. Природа низкой солености и особенности состава термальных вод провинции Цзянси (Китай) // Геология и геофизика. 2020. Т. 61. № 2. С. 243–262. DOI: 10.15372/GiG2019105.
- 36. Comparison of hydrogeological characteristics and genesis of the Xiaguan Hot Spring and the Butterfly Spring in Yunnan of China / Y.Q. Wu, X. Zhou, M.M. Wang, L.Y. Zhuo, H.F. Xu, Y. Liu // Journal of Hydrology. – 2021. – Vol. 593. – 125922. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2020.125922.
- 37. Estimation of the deep geothermal reservoir temperature of the thermal waters of the active continental margin (Okhotsk Sea coast, Far East of Asia) / I.V. Bragin, E.V. Zippa, G.A. Chelnokov, N.A. Kharitonova // Water. 2021. Vol. 13 (9). 1140. DOI: 10.3390/w13091140.
- 38. Павлов С.Х., Чудненко К.В. Формирование азотных терм в системах «вода–гранит» и «вода–порфирит» // Геохимия. 2023. Т. 68. № 3. С. 285–293. DOI: 10.31857/S0016752523030093.
- 39. Geochemical and isotopic techniques constraints on the origin, evolution, and residence time of low-enthalpy geothermal water in Western Wugongshan, SE China / L. Wang, K. Liu, Y. Ma, Y. Zhang, J. Tong, W. Jia, S. Zhang, J. Sun // Acta Geology Sinica. English Edition. – 2024. – Vol. 98. – P. 801–818. DOI: 10.1111/1755-6724.15161.
- 40. Состав и условия формирования азотно-кремнистых терм Амгинской группы (Северо-Восток Приморского края) / И.В. Брагин, А.А. Павлов, Г.А. Челноков, В.Ю. Лаврушин, Н.А. Харитонова // Тихоокеанская геология. 2024. Т. 43. № 2. С. 90–101. DOI: 10.30911/0207-4028-2024-43-2-90-101.

- 41. Микроэлементы в термальных водах северного Тянь-Шаня: распределение и механизмы накопления / Н.А. Харитонова, М.А. Соколовская, Е.И. Барановская, Г.А. Челноков, А.А. Карабцов, Л.Н. Чернощеков, И.В. Брагин // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. 2024. Т. 63. № 4. С. 70–86. DOI: 10.55959/MSU0579-9406-4-2024-63-4-70-86.
- Геологическая эволюция и самоорганизация системы вода-порода. Система вода-порода в земной коре: взаимодействие, кинетика, равновесие, моделирование / В.А. Алексеев, Б.Н. Рыженко, С.Л. Шварцев, В.П. Зверев, М.Б. Букаты, М.В. Мироненко, М.В. Чарыкова, О.В. Чудаев. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2005. – Т. 1. – 244 с.
- 43. Лунина О.В. Разломы плиоцен-четвертичной активизацииюга Восточной Сибири и их роль в развитии сейсмически индуцированных геологических процессов: дис. ... д-ра геол.-минерал. наук. Иркутск, 2015. 359 с.
- 44. Государственная геологическая карта Российской федерации. Масштаб 1:1000000 (третье поколение). Серия Алдано-Забайкальская. Лист N-49 – Чита: объяснительная записка / Н.А. Фишев, К.М. Шелгачев, В.И. Игнатович, Ю.П. Гусев и др. – СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2011. 604 с.
- 45. Микробиологический состав термальных вод Приморского края / Е.Г. Калитина, Г.А. Челноков, И.В. Брагин, Н.А. Харитонова // Вестник БГТУ имени В. Г. Шухова. 2014. № 1. С. 160–163.
- 46. Микробные сообщества Кульдурских термальных источников и их участие в накоплении микроэлементов и минералообразовании / Е.Г. Лебедева, Н.А. Харитонова, И.В. Брагин, Т.В. Кузьмина // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2023. – Т. 334. – № 1. – С. 116–125.
- 47. A rare earth element signature of bacteria in natural waters? / Y. Takahashi, T. Hirata, H. Shimizu, T. Ozaki, D. Fortin // Chemical geology. 2008. Vol. 244. P. 569-583.

#### Информация об авторах

**Евгения Витальевна Домрочева**, кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник Томского филиала Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, Россия, 634055, г. Томск, пр. Академический, 4; DomrochevaYV@ipgg.sbras.ru; https://orcid.org/0000-0001-9515-4296

**Елена Владимировна Зиппа**, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник Томского филиала Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, Россия, 634055, г. Томск, пр. Академический, 4; zev-92@mail.ru; https://orcid.org/0000-0003-0954-2116

Поступила в редакцию: 24.12.2024 Поступила после рецензирования: 10.01.2025 Принята к публикации: 02.04.2025

#### References

- Plyusnin A.M., Chernyavskii M.K., Zamana L.V., Shvartsev S.L., Tokarenko O.G. Hydrogeochemical peculiarities of the composition of nitric thermal waters in the Baikal Rift Zone. *Russian Geology and Geophysics*, 2013, t. 54, no. 5, pp. 495–508. (In Russ.) DOI: 10.1016/j.rgg.2013.04.002.
- 2. Garrels R.M, Christ C.L. Solutions, Minerals, and Equilibria. New York, Harper and Row, 1965. 368 p.
- 3. Bukaty M.B. Advertising and technical description of the HydroGeo software package. State number registration of algorithms and programs in the All-Russian Scientific and Technical Information Center (RSTIC). Moscow, VNTITs Publ., 2005. 7 p. (In Russ.)
- 4. Krainov S.R., Ryzhenko B.N., Shvets B.N. *Geochemistry of Groundwaters. Theoretical, applied and ecological aspects.* Moscow, CentrLitNefteGas Publ., 2012. 672 p. (In Russ.)
- Lipatnikova O.A., Grichuk D.V. Thermodynamic modeling of heavy metals forms in bottom sediments of the Ivankovsky Reservoir. *Moscow University Geology Bulletin Ser. 4. Geology*, 2011, no. 2, pp. 5–59. (In Russ.) DOI: 10.3103/s0145875211020062.
- 6. Nikitenkov A.N., Novikov D.A., Korneeva T.V. Forms of migration of chemical elements in radon waters in the South of Siberia. *Geology and mineral resources of Siberia*, 2023, no. 2 (54), pp. 81–90. (In Russ) DOI: 10.20403/2078-0575-2023-2-81-90
- Sidkina E.S., Toropov A.S., Konyshev A.A. Geochemical features of natural water of building stone quarries in Pitkäranta area (Karelia). Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering, 2023, vol. 334, no. 4, pp. 7–21. (In Russ.) DOI: 10.18799/24131830/2023/4/3954
- 8. Kolubaeva Y.V. Forms of migration of chemical elements in the waters of the northern part of the Kolyvan-Tomsk folded zone. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2013, vol. 322, no. 1, pp. 136–141. (In Russ.)
- 9. Lepokurova O.E., Trifonov N.S., Domrocheva E.V. Migration forms of the main ions of groundwater in coal-bearing sediments of Kuzbass with an emphasis on compounds with humic acids (based on modeling results). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, no. 3, pp. 76–89. (In Russ.) DOI: 10.18799/24131830/2024/10/4775
- Bryan N.D., Jones D.M., Appleton M., Livens F.R., Jones M.N., Warwick P., King S., Hall A. A physicochemical model of metal-humate interactions. *The Journal of Physical Chemistry*, 2000, vol. 2, pp. 1291–1300.
- 11. Ma H., Kim S.D., Cha D.K., Allen H.E. Effect of kinetics of complexation by humic acid on toxicity of copper to Ceriodaphnia Dubia. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 1999, vol. 18, no. 5, pp. 828–837.
- 12. Xue H., Sigg L. Comparison of the complexation of Cu and Cd by humic or fulvic acids and by ligands observed in lake waters. *Aquatic Geochemistry*, 1999, vol. 5, pp. 313–335.
- 13. Kimuro S., Kirishima A., Kitatsuji Y., Miyakawa K., Akiyama D., Sato N. Thermodynamic study of the complexation of humic acid by calorimetry. *Journal of chemical thermodynamics*, 2019, vol. 132, pp. 352–362.

- 14. Lenhart J.J., Cabaniss S.E., MacCarthy P. Uranium(VI) complexation with citric, humic and fulvic acids. *Radiochimica Acta*, 2000, vol. 88, pp. 345–353.
- 15. Dinu M.I., Shkinev V.M. Complexation of metal ions with organic substances of humus nature: research methods and structural features of ligands, distribution of elements by forms. *Geochemistry*, 2020, vol. 65, no. 2, pp. 165–177. (In Russ.) DOI: 10.1134/S0016702920020032
- 16. Barnie S., Zhang J., Obeng P., Duncan A., Adenutsi C., Xu L., Chen H. Mechanism and multi-step kinetic modelling of Cr(VI) adsorption, reduction and complexation by humic acid, humin and kerogen from different sources. *Environmental science and pollution research*, 2021, no. 28 (29), pp. 38985–39000. DOI: 10.1007/s11356-021-13519-z.
- 17. Abualhaija M.M., Whitby H., Constant M.G. Competition between copper and iron for humic ligands inestuarine waters. *Marine Chemistry*, 2015, vol. 172, pp. 46–56. DOI: 10.1016/j.marchem.2015.03.010.
- 18. Yamamoto Y., Kita F., Isono N., Imai S. Impact of competitive Fe(III) ion on the complexation of humic acid and toxic metal ions. *The Japan Society for Analytical Chemistry*, 2017, vol. 66, no. 12, pp. 875–883.
- Tang J., Zhuang L., Yu Z., Liu X., Wang Y., Wen P., Zhou S. Insight into complexation of Cu(II) to hyperthermophilic compostderived humic acids by EEM-PARAFAC combined with heterospectral two dimensional correlation analyses. *Science of the Total Environment*, 2019, vol. 656, pp. 29–38.
- 20. Cherkasova E., Konyshev A., Soldatova E. Metal speciation in water of the flooded mine «Arsenic» (Karelia, Russia): equilibrium-kinetic modeling with a focus on the influence of humic substances. *Aquatic Geochemistry*, 2021, vol. 27, no. 2, pp. 141–158.
- Lepokurova O.E., Domrocheva E.V. Elemental composition of natural waters and host deposits of Kuzbass with assessment of water migration (on the example of Naryksko-Ostashkinskaya square). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 2, pp. 200–213. (In Russ.) DOI: 10.18799/24131830/2024/10/4775
- 22. Malova A.I., Sidkina E.S., Ryzhenko B.N., Lomonosov M.V. Dia-mond deposit model as a water-rock system: forms of migration, saturation of groundwater relative to rock-forming and ore miner-als, environmental assessment of water quality. *Geochemistry*, 2017, no. 12, pp. 1128–1140. (In Russ.)
- 23. Borisenko I.M., Zamana L.V. *Mineral water of Buryat ASSR*. Ulan-Ude, Buryatskoe knizhnoe Izdatelstvo, 1978. 162 p. (In Russ.)
- 24. Michard G. Behavior of major elements and some trace elements (Li, Rb, Cs, Sr, Fe, Mn, W, F) in deep hot water from granitic areas. *Chemical Geology*, 1990, vol. 89, pp. 117–134. DOI: 10.1016/0009-2541(90)90062-C.
- 25. Polyak B.G., Prasolov E.M., Tolstikhin I.N., Kozlovtseva S.V., Kononov V.I., Khutorskii M.D. Helium isotopes in fluids of the Baikal Rift Zone. *Izvestiya akademii nauk SSSR. Seriya Geology*, 1992, no. 10, pp. 18–33. (In Russ.)
- 26. Minissale A., Magro G., Tassi F., Verrucchi C. Origin and circulation patterns of deep and shallow hydrothermal fluids in the Mt. A`miata geothermal region (central Italy). In Proceedings 8<sup>th</sup> International Symposium on Water Rock Interaction. Rotterdam, Balkema Publ., 1995. pp. 523–528.
- 27. Yum B.W. Movement and hydrogeochemistry of thermal waters in granite at Gosuns, Republic of Korea. *In Proceedings* δ<sup>th</sup> *International Symposium on Water-Rock Interaction.* Rotterdam, Balkema Publ., 1995. pp. 401–404.
- 28. Pavlov S.K., Chudnenko K.V. Formation of nitrogen-rich hot springs: modeling physicochemical interactions in a water-granite system. *Geochemistry International*, 2013, vol. 51 (12), pp. 981–993.
- 29. Shvartsev S.L., Sun Z., Borzenko S.V., Gao B., Tokarenko O.G., Zippa E.V. Geochemistry of the thermal waters in Jiangxi Province, China. *Applied Geochemistry*, 2018, vol. 96, pp. 113–130. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2018.06.010.
- 30. Pasvanoğlu S., Çelik M. A conceptual model for groundwater flow and geochemical evolution of thermal fluids at the Kızılcahamam geothermal area, Galatian volcanic Province. *Geothermics*, 2018, vol. 71, pp. 88–107. DOI: 10.1016/j.geothermics.2017.08.012
- Alçiçek H., Bülbül A., Brogi A., Liotta D., Ruggieri G., Capezzuoli E., Meccheri M., Yavuzer İ., Alçiçek M.C. Origin, evolution and geothermometry of the thermal waters in the Gölemezli Geothermal Field, Denizli Basin (SW Anatolia, Turkey). *Journal of Volcanology and Geothermal Resources*, 2018, vol. 349, pp. 1–30. DOI: 10.1016/j.jvolgeores.2017.07.021.
- 32. Lepokurova O.E. Sodium-bicarbonate groundwaters in southeastern West Siberia, Russia: Compositions, types, and formation conditions. *Applied Geochemistry*, 2020, vol. 116, 104579. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2020.104579.
- 33. De M.E., Broe J.W. Coburn Aluminum and Renal Failure. *Developments in Nephrology 26.* Dordrecht, Kluwer Academic Publ., 1990. 378 p. DOI: 10.1007/978-94-009-1868-9.
- 34. Lavrushin V.Yu. Underground fluids of the Greater Caucasus and its surroundings. Moscow, GEOS Publ., 2012. 348 p.
- 35. Shvartsev S.L., Zippa E.V., Borzenko S.V. The Nature of Low Salinity and Composition Peculiarities of Thermal Waters in Jiangxi Province (China). *Russian Geology and Geophysics*, 2020, vol. 61, no. 2, pp. 196–213. (In Russ.) DOI: 10.15372/GiG2019105.
- 36. Wu Y.Q., Zhou X., Wang M.M., Zhuo L.Y., Xu H.F., Liu Y. Comparison of hydrogeological characteristics and genesis of the Xiaguan Hot Spring and the Butterfly Spring in Yunnan of China. *Journal of Hydrology*, 2021, vol. 593, 125922. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2020.125922.
- 37. Bragin I.V., Zippa E.V., Chelnokov G.A., Kharitonova N.A. Estimation of the deep geothermal reservoir temperature of the thermal waters of the active continental margin (Okhotsk Sea Coast, Far East of Asia). *Water*, 2021, vol. 13 (9), 1140. DOI: 10.3390/w13091140.
- 38. Pavlov S.K., Chudnenko K.F. Formation of nitric thermal waters in systems «water-granite» and «water-porphyri». *Geochemistry*, 2023, vol. 68, no. 3, pp. 285–293. DOI: 10.31857/S0016752523030093. (In Russ.)
- 39. Wang L., Liu K., Ma Y., Zhang Y., Tong J., Jia W., Zhang S., Sun J. Geochemical and isotopic techniques constraints on the origin, evolution, and residence time of low-enthalpy geothermal water in Western Wugongshan, SE China. Acta Geology Sinica. English Edition, 2024, vol. 98, pp. 801–818. DOI: 10.1111/1755-6724.15161.

- Bragin I.V., Pavlov A.A., Chelnokov G.A., Lavrushin V.Yu., Kharitonova N.A. Composition and formation conditions of nitrogen-siliceous thermal waters of the Amga group (northeast of Primorsky krai). *Tikhokeanskaya geologiya*, 2024, vol. 43, no. 2, pp. 90–101. (In Russ.) DOI: 10.30911/0207-4028-2024-43-2-90-101.
- Kharitonova N.A., Sokolovskaya M.A., Baranovskaya E.I., Chelnokov G.A., Karabtsov A.A, Chernoshchekov L.N., Bragin I.V. Trace elements in thermal waters of the northern Tien Shan: distribution and fate. *Moscow University Bulletin. Series 4. Geology*, 2024, vol. 63, no. 4, pp. 70–86. (In Russ.) DOI: 10.55959/MSU0579-9406-4-2024-63-4-70-86.
- 42. Alekseev V.A., Ryzhenko B.N., Shvartsev S.L., Zverev V.P., Bukaty M.B., Mironenko M.V., Charykova M.V., Chudaev O.V. Geological evolution and self-organization of the water-rock system. Vol. 1 Water-rock system in the Earth's crust: interaction, kinetics, equilibrium, and modeling. Novosibirsk, Sib. Otd. Ross. Akad. Nauk Publ., 2005. 244 p. (In Russ.)
- 43. Lunina O.V. Faults of the Pliocene-Quaternary activation of the south of Eastern Siberia and their role in the development of seismically induced geological processes. Dr. Diss. Irkutsk, 2015. 359 p. (In Russ.)
- 44. State Geological Map of the Russian Federation. Scale 1:1000000 (third version). Seriya Aldan-Transbaikal. List N-49-Chita. Eds. N.A. Fishev, K.M. Shelgachev, V.I. Ignatovich, Yu.P. Gusev. Saint Petersburg, VSEGEI Publ., 2011. 604 p. (In Russ.)
- 45. Kalitina E.G., Chelnokov G.A., Bragin I.V., Kharitonova N.A. Microbiological composition of thermal waters of Primorsky Krai. *Bulletin of the V. G. Shukhov BSTU*, 2014, no. 1, pp. 160–163. (In Russ.)
- 46. Lebedeva E.G., Kharitonova N.A., Bragin I.V., Kuzmina T.V. Microbial communities of the Kuldur thermal springs and their participation in the accumulation of microelements and mineral formation. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2023, vol. 334, no. 1, pp. 116–125. (In Russ.) DOI: 10.18799/24131830/2023/1/3796.
- 47. Takahashi Y., Hirata T., Shimizu H., Ozaki T., Fortin D. A rare earth element signature of bacteria in natural waters? *Chemic al geology*, 2008, vol. 244, pp. 569–583.

#### Information about the authors

**Evgeniya V. Domrocheva**, Cand. Sc., Senior Researcher, Tomsk Branch of the Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of SB RAS, 4, Akademichesky avenue, Tomsk, 634055, Russian Federation; DomrochevaYV@ipgg.sbras.ru; https://orcid.org/0000-0001-9515-4296

**Elena V. Zippa**, Cand. Sc., Senior Researcher, Tomsk Branch of the Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of SB RAS, 4, Akademichesky avenue, Tomsk, 634055, Russian Federation; zev-92@mail.ru; https://orcid.org/0000-0003-0954-2116

Received: 24.12.2024 Revised: 10.01.2025 Accepted: 02.04.2025 УДК 550.4.02; 553.3/.4; 502.5 DOI: 10.18799/24131830/2025/5/4717 Шифр специальности ВАК: 1.6.21 Обзорная статья

# Экспериментальное выщелачивание рудоносных пород Дарасунского месторождения золота

## Е.С. Эпова⊠, Г.А. Юргенсон, О.В. Еремин

Институт природных ресурсов, экологии и криологии Сибирского отделения Российской академии наук, Россия, г. Чита

<sup>⊠</sup>apikur1@ya.ru

Аннотация. Актуальность данной работы определяется необходимостью понимания процессов геохимического преобразования руд при воздействии разных реактивных растворов, а также оценки возможного распространения ряда потенциально опасных элементов в компонентах ландшафта. Эффективность извлечения элементов при взаимодействии руд с разными реагентами может быть использована при разработке новых, более экологически безопасных технологических схем их добычи. **Цель.** Выявление комплекса элементов, переходящих в подвижное состояние при взаимодействии сульфидных руд Дарасунского месторождения с различными реагентами (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, NH<sub>4</sub>HCO<sub>3</sub>). **Методы.** Экспериментального моделирования геохимического преобразования руд. **Результаты и выводы.** При взаимодействии руд с разными видами реагентов наиболее реактивным показал себя раствор серной кислоты, им в 2 раза интенсивнее извлекаются наиболее высокие концентрации элементов сульфидов (Cu, Pb, Zn, Ni, Sn, Cd, Sr, Co). Только этим реагентом извлекаются Y, Be, Ga и лантаноиды. Раствором гидрокарбоната аммония извлекаются Мо, Zr, P, Sc, Cr. В подвижное состояние переходят Al, Cu, Pb, Zn, Ni, Te и Tl при взаимодействии с растворами серной кислоты и гидрокарбоната на руды, при этом в фильтрате перекиси водорода отсутствуют. Калий и натрий извлекаются только растворами перекиси водорода и серной кислоты примерно в равных концентрациях (коэффициент корреляции 0,99).

**Ключевые слова**: экспериментальное моделирование, выщелачивание рудоносных пород, миграция элементов, зона гипергенеза, Дарасунское месторождение золота

Благодарности: Работа выполнена в рамках государственного задания FUFR-2021-0005.

**Для цитирования:** Эпова Е.С., Юргенсон Г.А., Еремин О.В. Экспериментальное выщелачивание рудоносных пород Дарасунского месторождения золота // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 5. – С. 100–109. DOI: 10.18799/24131830/2025/5/4717

UDC 550.4.02; 553.3/.4; 502.5 DOI: 10.18799/24131830/2025/5/4717 Review article

## Experimental leaching of ore-bearing rocks of the Darasun gold deposit

## E.S. Epova<sup>™</sup>, G.A. Yurgenson, O.V. Eremin

Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Chita, Russian Federation

<sup>⊠</sup> apikur1@ya.ru

**Abstract.** *Relevance.* The need to understand the processes of geochemical transformation of ores under the impact of different reactive solutions, as well as to assess the possible distribution of a number of potentially hazardous elements in land-scape components. The efficiency of element extraction during the interaction of ores with different reagents can be used in the development of new, more environmentally friendly technological schemes for their extraction. *Aim.* To identify the com-

plex of elements that pass into a mobile state during the interaction of sulfide ores of the Darasun deposit with various reagents (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, NH<sub>4</sub>HCO<sub>3</sub>). *Methods.* Experimental modeling of geochemical transformation of ores. *Results and conclusions.* At interaction of ores with different types of reagents the sulfuric acid solution proved to be the most reactive, it extracts the highest concentrations of sulfide elements (Cu, Pb, Zn, Ni, Sn, Cd, Sr, Co) two times more intensively. Only with this reagent Y, Be, Ga and lanthanides are extracted. Ammonium hydrogen carbonate solution extracts more As, Sb, Bi, Ag, Rb, Cs, In, U and Th than sulfuric acid solution, and only this reagent extracts Mo, Zr, P, Sc, Cr. Al, Cu, Pb, Zn, Ni, Te and Tl pass into the mobile state when interacting with solutions of sulfuric acid and hydrogen carbonate on the ore, and hydrogen peroxides are absent in the filtrate. Potassium and sodium are extracted only by solutions of hydrogen peroxide and sulfuric acid in approximately equal concentrations (correlation coefficient 0.99).

Keywords: experimental modelling, leaching of ore-bearing rocks, element migration, hypergenesis zone, Darasun gold deposit

Acknowledgements: The work was performed within the framework of the state assignment FUFR-2021-0005.

**For citation:** Epova E.S., Yurgenson G.A., Eremin O.V. Experimental leaching of ore-bearing rocks of the Darasun gold deposit. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 5, pp. 100–109. DOI: 10.18799/24131830/2025/5/4717

#### Введение

Дарасунское месторождение золота расположено в пределах поселка Вершино-Дарасунский Тунгокоченского района Забайкальского края.

Месторождение представляет собой системы кварцево-сульфидных жил, образовавшихся в процессе эволюции Дарасунской рудно-магматической системы, функционировавшей в период 174±10–145±4 млн л. н. [1].

В рудах месторождения определено более 100 минеральных видов. Отличительной чертой является высокое (15-60 %) содержание сульфидов (пирит, арсенопирит, халькопирит, галенит, сфалерит, пирротин и др.) и сульфосолей (бурнонит, тетраэдрит, фрейбергит, тетрадимит и др.). Главные рудные минералы: пирит, арсенопирит, сфалерит, галенит, халькопирит, пирротин, бурнонит, блеклые руды (тетраэдрит, фрейбергит и др.); из них основные пирит (14 %), арсенопирит (12 %). Жильные минералы представлены кварцем (32 %), карбонатами (11 %), турмалином, хлоритом, мусковитом и другими.

Руды содержат в среднем 14,6–15,4 г/т золота при общей вариации от единиц до 500 г/т. Золото самородное мелкое и субмикроскопичное от 0,06–15 мкм до 2 мм. Основными носителями золота являются пирит (19,8 г/т), арсенопирит (37,3 г/т), халькопирит (84,6 г/т), сульфосоли (13,9 г/т). Однако золото не входит в состав этих минералов, а образует тончайшие включения в них в виде золота самородного различной пробности и электрума. Нередко Au находится в теллуридах – петците, калаверите, креннерите и др.

Окисление сульфидных минералов с участием воды и кислорода приводит к формированию сернокислотных рудничных растворов, преображающих геохимическую обстановку горнорудной территории путем выноса ряда элементов из состава пород и руд [2–5]. Кислотность таких вод может иметь значения pH от 2 до 3 [4–10]. Кислые рудничные воды несут с собой множество элементов, которые при попадании в различные компоненты ландшафта (почвы, растения) могут включаться в биогеохимические круговороты и представлять потенциальную опасность здоровью местного населения [11–19].

Однако не только сернокислотный дренаж способствует извлечению элементов из руд и пород в ландшафты, но также и другие геохимические обстановки, например окислительные процессы при отсутствии сульфидов в зонах аэрации, присутствие карбонатных пород и минералов или гидрокарбонатных растворов. Во многих технологических схемах извлечения ценных компонентов используются в качестве окислителей различные пероксиды, в том числе перекись водорода [20–26]. Часто в качестве реагентов используются карбонаты и гидрокарбонаты [27–32].

Целью настоящего исследования является изучение комплекса элементов, выщелачивающихся из руд Дарасунского месторождения при взаимодействии с различными реагентами (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, NH<sub>4</sub>HCO<sub>3</sub>).

#### Материалы и методы

Для исследования использовалась усредненная проба, полученная из серии проб, отобранных из разных рудных тел Дарасунского месторождения золота. После дробления образцов отбиралась фракция 0,5–1 мм. Навески промывались дистиллированной водой от пыли, высушивались в сушильном шкафу при температуре 45 °C, затем по 40 г руды помещались в шприцы 20 мл, на выходе для фильтрации мелких частиц добавлен фильтр «красная лента».

Выщелачивание производилось тремя реагентами: сернокислотным раствором pH=2, имитирующим воздействие кислого рудничного дренажа, образующегося в результате окисления сульфидов; раствором перекиси водорода (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) 5 % для создания окислительных условий при отсутствии серы (S); раствором гидрокарбоната аммония (NH<sub>4</sub>HCO<sub>3</sub>) концентрацией 0,1 моль – имитация влияния карбонатов на процесс преобразования руд либо их взаимодействие с углекислым газом (CO<sub>2</sub>). Для равномерной и постоянной подачи реагента использовался перистальтический насос «Peristaltic pump type pp1-05» (Польша), скорость протекания раствора через навеску 3 мл/мин. Кислотность исходного (pH=2) сернокислотного раствора определялась потенциометрическим методом с использованием pH-метра «Анион-7000» (Россия) с комбинированным электродом марки ЭСР10601/4. Фильтрат отбирался по 40 мл [33–35].

Золото в твердых пробах определялось пробирным анализом, концентрации остальных элементов в пробах руд, пород и профильтрованных растворов устанавливались методом масспектрометрии с индукционно связанной плазмой в аккредитованной лаборатории СЖС «Восток Лимитед». Все окислы силикатной группы определены методом ICP95A, а в форме элементов – ICM40B.

Исследования минерального состава проб выполнены в шлифах и аншлифах с помощью оптического поляризационного микроскопа AXIO ScopeAI и электронно-зондовым методом на растровом электронном микроскопе LEO 1430 VP (аналитик Е.А. Хромова, ГИН СО РАН, г. Улан-Удэ, руководитель лаборатории канд. техн. наук С.В. Канакин). Использовано более 800 точек измерения состава минералов и их ассоциаций.

#### Результаты

Химический состав руд представлен в табл. 1, 2. Как видно из табл. 2, в целом в рудах Дарасунского месторождения превышают кларк земной коры концентрации халькофильных элементов (Cu, Zn, Cd, Pb, Mo, Sn, Ag, Au, As, S, Sb, Bi, Se, Te, In, Tl), что вполне объяснимо наличием большого количества сульфидов и других рудных минералов (табл. 3). Детально изучен также минеральный состав руд и химический состав минералов, основных носителей халькофильных и сидерофильных химических элементов (табл. 3).

#### Обсуждение и заключение

Силикатный анализ показал существенное значение алюмосиликатной составляющей руд, входящей в состав силикатов (кварц, полевые шпаты, амфиболы, слоистые силикаты, турмалин, эпидот). Полевые шпаты представлены в основном микроклином, частично плагиоклазами. Из слоистых силикатов развиты мусковит, хлорит, каолинит. Присутствует также эпидот (алланит), отличающийся примесями редкоземельных элементов. Носителями щелочноземельных элементов являются карбонаты, представленные кальцитом, доломитом, реже - анкерит, а также апатит, эпидот, амфиболы. Основная часть халькофильных элементов связана с широко развитыми халькопиритом, сфалеритом, галенитом, а также различными редкими сульфосолями и сульфидами. Основными носителями серы являются пирит, арсенопирит, пирротин, халькопирит, висмутин и др. Вольфрам связан с шеелитом, а кобальт и никель - с сульфидами.

Руда отличается высоким содержанием мышьяка, основным носителем которого является арсенопирит. В меньшей мере мышьяк связан с сульфосолями. Носителями сурьмы также являются сульфосоли, прежде всего, буланжерит и фрайбергит. Высокие содержания висмута обусловлены широким развитием висмутина, козалита, тетрадимита, частично он связан с галенитом, а также теллуровистутитами и цумоитом. Теллур связан с большим числом теллуридов (гессит, тетрадимит, пильзенит, алексит и др.). Часть теллура и селена связана с пиритом. Золото и серебро находятся как в виде золота самородного, электрума, так и в виде их сульфидов и сульфосолей (ютенбогаардтит, фрейбергит и др.).

Таблица 1. Силикатный анализ руд месторождения Дарасунское, %

Table 1.	Silicate	analysis of o	res of Dara	sun deposit	,%						
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	MnO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	$Cr_2O_3$	S
4,53	1,61	32,4	1,33	0,1	0,71	0,53	0,07	28,4	0,4	0,01	30

Таблица 2. Химический состав руд месторождения Дарасунское в сравнении с кларком земной коры

Table 2. Chemical composition of ores of the Darasun deposit in comparison with the crustal clark

	-	-							
Элементы/Elements	Cu	Zn	Pb	Cd	W	Со	Re	Мо	Sn
Концентрация в руде, г/т/Concentration in ore, ppm	17785	42817	27647	186	289	81,6	0,012	115	7,2
Кларк земной коры, г/т/Earth's crust, ppm	47	83	16	0,13	1,3	18	0,0007	1,1	2,5
Элементы/Elements	Ag	Au	As	Sb	Bi	Se	Те	In	Tl
Концентрация в руде, г/т Concentration in ore, ppm	272	142	45600	315	63,1	3,17	41,9	12,4	2,93
Кларк земной коры, г/т/Earth's crust, ppm	0,07	0,0043	1,7	0,5	0,009	0,05	0,001	0,25	1

Hазвание/Title	Формула/Formula	Химический состав и примеси, мас. % Chemical composition and impurities, wt %
Золото самородное/Nugget gold	Au	Au (69,0995,52), Ag (3,0927,61), Hg (1,645,55), Cu (0,545,61)
Электрум/Electrum	Au.Ag	Au (πο 48.95), Ag(36.9351.35)
Висмут самородный		
Nugget bismuth	Bi	Рb (до 0,9), Те (до 0,02)
Кальцит/Calcite	CaCO <sub>3</sub>	Mn (0,821, 81), Fe 0,73 –1,21)
Доломит/Dolomite	$CaMg(CO_3)_2$	Fe (0,812,1), Mn (0,061,1)
Сидерит/Siderite	FeCO <sub>3</sub>	Mn (1.331.74). Ca (0.240.51)
Анкерит/Ankerite	$CaFe^{2+}(CO_3)_2$	Mn (1.391.94)
Пирит/Pyrite	FeS <sub>2</sub>	Co (0.541.13), Ni (0.44), As (0.42 –2.3), Sb (0.77)
Марказит/Marcasite	FeS <sub>2</sub>	As (0.010.03)
Арсенопирит/Arsenopyrite	FeAsS	Co (0.03). Ni (0.020.03)
Галенит/Galena	PhS	Ag (0.769.15), Fe (0.661, 31), Bi (0, 173.6)
Сфалерит/Sphalerite	ZnS	Fe $(7.015.45)$ , Mn $(0.060.09)$ , Cd $(0.530.87)$ , Tl $(\pi 0.0.003)$
Пирротин/Pyrrhotite	Fe <sub>7</sub> S <sub>8</sub>	Ni (0.0110.013). Co (0.012)
Халькопирит/Chalconvrite	CuFeS <sub>2</sub>	$C_0(0.46) A_S(\pi_0.0.64) N_I(0.011, 0.41)$
Висмутин/Rismuthinite	BiaSa	Ві (80, 07, 80, 41) S (19,59, 19,93), (Ге до 3,63)
bilenty milly bisindenninee	51203	$C_0(0.96, 3.18)$ Ni (23.35, 25.74) Sh (52.48, 53.75)
Виллиамит/Willyamite	(Co,Ni) SbS	S (14.1214,61), Bi (1,791,55), Fe (1,152,49)
Ульманит/Ullmannite	(NiSbS)	Ni $(26,5427,28)$ , Sb $(49,3256,06)$ , S $(14,915,02)$ , Fo $(0.57, C)$ $(0.83, 0.87)$ , Ac $(40, 7,27)$
		$\frac{\Gamma c (v, 37, cu (v, 03 - v, 07); AS (4, 3 - 7, 37)}{Db (37, 60, 37, 58) B; (20, 72, 41, 10) C (15, 02, 15, 27)}$
Козалит/Cosalite	$Pb_2Bi_2S_5$	Ag (6,286,95); Sb (1,681,81)
Vežerezer (Ileurezel-ite	DF D: C	Pb (52,2957,69), Bi (24,9828,55), S (14,0515,68),
леировскит/ неугоузкие	PD <sub>6</sub> Bl <sub>2</sub> S <sub>9</sub>	Ag (1,533,56); Sb (0,82,15)
Ютенбогаардтит	Age Aus	Ag (42,9753,57), Au (33,7844,62),
Uytenbogaardtite	Ag3Au3	S (11,2813,61), Cu (0,0061,12)
Фрейбергит/Freibergite	(Ag,Cu,Fe) <sub>12</sub> (Sb,As) <sub>4</sub> S <sub>13</sub>	Ag (3,083,87),Cu (33,4835,07), Fe (4,829,07), Sb (21,0423,27),
Фаматинит/Famatinite	Cu2SbS4	AS $(2,153,65)$ S $(25,1926,51)$ Cu $(37.6,37.91)$ Sh $(28.45,28.47)$ S $(24.37,24.86)$ 7n $(5.42,6.93)$
	6435554	(1, (0, 77, 0, 95), Ag(1, 23, 2, 37), Ph (50, 07, 53, 03), Fe (0, 48-1, 19)
Буланжерит/Boulangerite	Pb5[Sb4S11]	Sb (15,4618,67), Bi (10,6612,59), S (15,861,96), As (до 0,58)
Тетрадимит/Tetradymite	Bi <sub>2</sub> Te <sub>2</sub> S	Bi (55,3755,74), Te (32,5732,83), S (5,555,57),
Foccur /Hossito	AgaTo	$\Lambda_{g}$ (56.7, 61.88) To (37.52, 43.3)
Ilymour /Tsumoite	BiTo	$\operatorname{Re}(50,7,,01,00), \operatorname{Re}(57,52,+3,5)$ Bi (65.21, 67.56) Te (32.44, 34.79) Ag (no.1.86) Sh (1.31, 1.81)
цумоит/тзипоне	Dire	Dh(10.6) Bi(41.75) To(14.7) S(4.22) Ag(0.82) Au(6.60)
Алексит/Aleksite	PbBi <sub>2</sub> Te <sub>2</sub> S <sub>2</sub>	FU(19,0), BU(41,73), Te(14,7), S(4,52), Ag(9,03), Au(0,09), Fe(1,58), Cu(1,53)
Пильзенит/Pilsenite	Bi <sub>4</sub> Te <sub>3</sub>	Ві (52,465,42), Те (32,637,96), Си (до 0,95), Fe (1,021.18), Ад (до 0,77)
Кварц/Quartz	SiO <sub>2</sub>	Al (до 0,78), Fe (0,260,99)
Микроклин/Microcline	KAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	Содержит до 0,44 Ва
Эпилот /Epidoto	Ca <sub>2</sub> AI (Fe <sup>3+</sup> ,	Основные катионные компоненты
эпидот/Ерисосе	AI)2[Si2O7][SiO4]O[OH]	Mn (до 0,26), Fe (до 10,86), Ca (до 15,31)
Турмалин/Tourmaline	$XY_{3}Z_{6}(BO_{3})_{3}[Si_{6}O_{18}](O,OH,F)_{4}$	Основной носитель бора
Рутил/Rutile	TiO <sub>2</sub>	V (до 0,79)
Mycковит/Muscovite	KAl <sub>2</sub> [Si,Al] <sub>4</sub> O <sub>10</sub> (OH,F) <sub>2</sub>	Примеси Ва (0,551,03), Fe (1,623,2), F (до 0,2)
Апатит/Apatite	Ca <sub>5</sub> [PO <sub>4</sub> ] <sub>3</sub> (Cl,OH,F)	Основной носитель фосфора, хлора (до 0,43) и части фтора (2,813,68)
Монацит/Monazite	(Ce,La,Nd,Th)PO4	Ce (29,5130,35), La (15,1516,02), Pr (1,462,11), Nd (10.66, 11.40), Sm (ro.10.2), P. (12.56, 12.07), Th (ro.18.51)
		(10,0011,47), эт (до 1,02), Р (13,3013,97), ТТ (до 18,51) Gd (3.543.59), Tb (до 1,37), Dv (6.368.13). Но (до 2.02)
Ксенотим/Xenotime	YPO <sub>4</sub>	Er (3,433,72), Yb (2,784,06), P(16,7416,82)
Рабдофан/Rhabdophane	(Ce,La,Nd,Th)PO <sub>4</sub> ·H <sub>2</sub> O	Ce (28,98), La (11,86), Pr (1,96), Nd (14,68), P (14,32)
Циркон/Zircone	Zr(Hf,Th)SiO <sub>4</sub>	Zr (48,9451,68), Hf (до 2,25), Th (до 1,13), Si (14,8915,35)
Бадделеит/Baddeleyite	Zr(Hf)O <sub>2</sub>	Zr (73,974,55), Hf (до 1,191,45), О (24,2624,66)
Торит/Thorite	ThSiO <sub>4</sub>	Th (45,4162,17), Si (6,9911,18)
Чёрчит (вайншенкит)	YPO₄•2H₂O	Y (37 54) Gd (2 24) Dv (4 92) Fr (5 02) Yh (4 05)
Churchite (weinshenkite)	11 04 21120	
Алланит-(Ce) (ортит) Allanite-(Ce) (orthite)	(Ce,Ca,La) <sub>2</sub> (Al,Fe <sup>3+</sup> ) <sub>3</sub> (SiO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> (OH)	Се[(5,128,02), Ca(9,1117,32), La (2,232,53), Pr (до1,05), Nd (2,374,63)] Al (11,4312,14), Fe <sup>3+</sup> (9,069,57), Si (15,6516.62)
Паризит-Ce/Parisite-Ce	Ca (Ce, La) <sub>2</sub> (CO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> $F_2$	Ca (6,01), Ce(31,28), La(14,48), Pr(2,05), Nd(9.63). Th(2.03). F(5.66)
Синхизит-Ce/Synchisite-Ce	Ca (Ce, La) (CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> F	Ca (10,94), Ce(25,75), La(13,33), Pr(1,87), Nd(9,76), F(4,36)

Таблица 3.Особенности состава минералов изученной руды Дарасунского месторождения золотаTable 3.Peculiarities of mineral composition of the studied ore of the Darasun gold deposit

Примеси редкоземельных элементов связаны с монацитом, рабдофаном, ксенотитом, а также синхизитом и паризитом. С ними же связана и часть фтора, который входит в состав мусковита и фторапатита. Носителями циркония и гафния являются циркон и бадделеит (табл. 3)

Содержание легких лантаноидов в рудах месторождения в два раза превосходит содержание элементов иттриевой группы, 61 и 28 г/т соответственно, что видно на графике нормирования концентраций в рудах к содержаниям в хондрите (рис. 1). При этом из всей группы редкоземельных элементов незначительно превышает кларк земной коры только Lu.



**Рис. 1.** Соотношение лантаноидов в рудах Дарасунского месторождения к хондриту, где С<sub>i</sub> – содержание элемента в руде, С<sub>h</sub> – содержание в хондрите

**Fig. 1.** Ratio of lanthanides in ores of the Darasun deposit to chondrite, where  $C_i$  is the content of the element in ore,  $C_h$  is the content in chondrite

В целом при взаимодействии руд с разными видами реагентов наиболее реактивным показал себя раствор серной кислоты. Этим реактивом извлекаются наиболее высокие концентрации элементов: Са, Mg, Fe, Mn, Ba, Sr, Cd, Co, Sn. Кроме того, только сернокислотный раствор выщелачивает из руд Y, Be, Ga и лантаноиды. Раствором гидрокарбоната аммония извлекается большее количество As, Sb, Bi, Ag, Rb, Cs, In, U и Th, чем сернокислотным, и только этим реактивом извлекаются Mo, Zr, P, Sc, Cr, Cs (рис. 2, 3).

Следующие элементы – Al, Cu, Pb, Zn, Ni, Te и Tl выщелачиваются как растворами серной кислоты, так и растворами гидрокарбоната аммония, при этом в фильтратах перекиси водорода отсутствуют.

Калий и натрий извлекаются только растворами перекиси водорода и серной кислоты примерно в равных концентрациях (коэффициент корреляции 0,99).

В общей сложности из руд извлекаются макрокомпоненты ( $\geq 1$  мг/л): Ca, Mg, P, Fe и As; в концентрациях ( $\leq 1$  мг/л): Cu, Pb, Zn, Cd, Ag, Sb, Mn, Mo Co, Sr, Sc, Cr, Cs и Rb.

Халькофильные элементы в большинстве лучше извлекаются раствором серной кислоты, но в незначительных количествах (табл. 4). Исключение составляют элементы V группы I подгруппы и серебро, для которых более интенсивным реагентом оказался аммония гидрокарбонат (рис. 2, a). Мышьяк и сурьма переходят в подвижное состояние на 33 и 16,6 %, соответственно. Висмут обнаружен только в фильтратах NH<sub>4</sub>HCO<sub>3</sub> в незначительных количествах (0,2 % от исходного содержания в навеске). Селен и теллур примерно в равной степени эффективно извлекаются растворами серной кислоты и гидрокарбоната аммония (коэффициент корреляции 0,99).

Из сидерофильных элементов в подвижное состояние при воздействии разными реагентами переходят Fe, Co и Ni (рис. 4), при этом активнее всего выщелачиваются сернокислотным раствором. Молибден активно извлекается только раствором гидрокарбоната аммония.



**Рис. 2.** Динамика извлечения литофильных элементов на примере стронция (а) и рубидия (б) из руд месторождения золота Дарасунское в течение времени различными реагентами

*Fig. 2.* Dynamics of extraction of lithophile elements on the example of strontium (a) and rubidium (b) from ores of Darasun gold deposit during time by different reagents



**Рис. 3.** Динамика извлечения халькофильных элементов на примере мышьяка (а) и цинка (б) из руд месторождения золота Дарасунское в течение времени различными реагентами

**Таблица 4.** Доли извлечения халькофильных элементов из руд Дарасунского месторождения золота различными реагентами

Table 4.	Fractions o	of extraction o	f chalco	philic elements	from ores o	f Darasun .	gold de	posit b	y di	fferent rea	gents
----------	-------------	-----------------	----------	-----------------	-------------	-------------	---------	---------	------	-------------	-------

Deenerum /Deegent	Элементы/Elements											
Pearent/Reagent	Zn	Pb	Cd	Sn	Cu	Ag	Tl	As	Sb	Bi	Se	Те
NH <sub>4</sub> HCO <sub>3</sub>	0,12	0,61	0,13	0,3	0,1	0,17	4,9	33,3	16,6	0,2	11	0,32
$H_2O_2$	0,01	0,01	-	0,5	0,001	0,07	0	15,3	9,2	-	9,5	0,13
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	136	0.63	236	23	01	0.06	18.2	275	9	_	15	033

«-» концентрации элемента в фильтрате ниже предела обнаружения/element concentration in the filtrate is below the detection limit.



**Рис. 4.** Динамика извлечения сидерофильных элементов на примере кобальта (а) и никеля (б) из руд месторождения золота Дарасунское в течение времени различными реагентами

*Fig. 4.* Dynamics of recovery of siderophilic elements on the example of cobalt (a) and nickel (b) from ores of Darasun gold deposit during time by different reagents

В целом комплекс элементов, переходящих в подвижное состояние, коррелирует с их содержанием в исходных минеральных ассоциациях (табл. 3) в виде основных компонентов либо в виде примесей. Так, эффективно извлекаемый в прочих экспериментальных исследованиях [34, 35] вольфрам, в экспериментальных растворах с Дарасунскими рудами имеет концентрации ниже пределов обнаружения, при этом его содержание в руде значительно выше кларка земной коры (табл. 2), что,

Fig. 3. Dynamics of extraction of chalcophilic elements on the example of arsenic (a) and zinc (b) from ores of Darasun gold deposit during time by different reagents

скорее всего, определяется тем, что в исходных рудах он находится в составе достаточно инертного минерала – шеелита. Извлечение Ві только раствором гидрокарбоната аммония может быть связано его сродством к кабонатам либо также определяется более легким разложением висмутина и тетрадимита в восстановительных условиях, в отличие от окислительных.

#### Выводы

При взаимодействии руд с разными видами реагентов наиболее реактивным показал себя раствор серной кислоты, им извлекаются наиболее высокие концентрации ряда элементов. Так, основные компоненты сульфидов (Cu, Pb, Zn, Ni, Sn, Cd, Sr, Co) как минимум в 2 раза интенсивнее извлекаются раствором серной кислоты. Только этим реагентом извлекаются Y, Be, Ga и лантаноиды.

Раствором гидрокарбоната аммония извлекается большее количество As, Sb, Bi, Ag, Rb, Cs, In, U и Th, чем сернокислотным, и только этим реактивом извлекаются Mo, Zr, P, Sc, Cr. В подвижное состояние переходят Al, Cu, Pb, Zn, Ni, Te и Tl при взаимодействии руды с растворами серной кислоты и гидрокарбоната, при этом в фильтрате перекиси водорода отсутствуют.

Калий и натрий извлекаются только растворами перекиси водорода и серной кислоты примерно в равных концентрациях (коэффициент корреляции 0,99).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Юргенсон Г.А., Юргенсон Т.Н. Дарасунское рудное поле // Месторождения Забайкалья. Т. 1. Кн. 2. М.: Геоинформмарк, 1995. С. 4–15.
- Thomas G., Sheridan C., Holm P.E. Arsenic contamination and rare earth element composition of acid mine drainage impacted soils from South Africa // Minerals Engineering. – 2023. – Vol. 203. – P. 108288 DOI: https://doi.org/10.1016/j.mineng.2023.108288
- 3. Geochemical and mineralogical aspects of acid mine drainage associated with 100 years of coal mining in the arctic, Svalbard (78°N) / C. Zwahlen, A. Rehn, T. Aiglsperger, B. Dold // Journal of Geochemical Exploration. 2023. Vol. 252. P. 107266 DOI: https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2023.107266
- Mobility of Po and U-isotopes under acid mine drainage conditions: an experimental approach with samples from Río Tinto area (SW Spain) / L. Barbero, M.J. Gázquez, J.P. Bolívar, M. Casas-Ruiz, A. Hierro, M. Baskaran, M.E. Ketterer // Journal of Environmental Radioactivity. – 2014. – Vol. 138. – P. 384–389. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2013.11.004
- Spatiotemporal evolution of U and Th isotopes in a mine effluent highly polluted by Acid Mine Drainage (AMD) / J.L. Guerrero, N. Suárez-Vaz, D.C. Paz-Gómez, S.M. Pérez-Moreno, J.P. Bolívar // Journal of Hazardous Materials. – 2023. – Vol. 447. – P. 130782 DOI: https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.130782
- 6. Nordstrom D.K. Aqueous pyrite oxidation and the consequent formation of secondary iron minerals // Acid sulfate weathering. 1982. Vol. 3. P. 37–39.
- 7. Вертикальное и латеральное распространение высокоминерализованных растворов кислого дренажа по данным электротомографии и гидрогеохимии (Урской отвал, Салаир) / В.В. Оленченко, Д.О. Кучер, С.Б. Бортникова, О.Л. Гаськова, А.В. Еделев, М.П. Гора // Геология и геофизика. 2016. Т. 57. № 4.– С. 782–795.
- Корнеева Т.В., Юркевич Н.В., Саева О.П. Геохимическое моделирование поведения тяжелых металлов в техногенных системах // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2018. – Т. 329. – № 3. – С. 89–101.
- 9. Шадрунова И.В., Самойлова А.С., Орехова Н.Н. Закономерности формирования медьсодержащих стоков на горных предприятиях // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2008. № 3. С. 304–311.
- 10. Захарова В.Я., Сквалецкий Е.Н. Геоэкологические прогнозы условий разработки южно-уральских медноколчеданных месторождений // Проблемы региональной экологии. 2011. № 5. С. 34–37.
- Microbial ecology of Río Tinto, a natural extreme acidic environment of biohydrometallurgical interest / E. González-Toril, A. Aguilera, N. Rodriguez, D. Fernández-Remolar, F., Gómez E. Diaz, A. García-Moyano, J.L. Sanz, R. Amils // Hydrometallurgy. – 2010. – Vol. 104. – Iss. 3–4. – P. 329–333. DOI: https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2010.01.011
- 12. Coal-source acid mine drainage reduced the soil multidrug-dominated antibiotic resistome but increased the heavy metal(loid) resistome and energy production-related metabolism / Q. Huang, Z. Liu, Y. Guo, B. Li, Z. Yang, X. Liu, J. Ni, X. Li, X. Zhang, N. Zhou, H Yin., C. Jiang, L. Hao // Science of The Total Environment. 2023. Vol. 873. P. 162330 DOI: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162330
- Immobilization of metal(loid)s from acid mine drainage by biological soil crusts through biomineralization / X. Kuang, L. Peng, Sh. Chen, Ch. Peng, H. Song // Journal of Hazardous Materials. – 2023. – Vol. 443. – Pt. B. – P. 130314 DOI: https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.130314
- Transport and fate of Cu and Cd in contaminated paddy soil under acid mine drainage / Y. Pan, H. Ye, Y. Yang, C. Yang, X. Li, T. Ma, Z. Dang, G. Lu // Journal of Environmental Management. – 2023. – Vol. 334. – P. 117517 DOI: https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.117517
- 15. Effects of lithology and acid mine drainage on Cd concentration and isotope distribution in a large riverine system, Guangxi Province, South China / Z. Zhou, H. Wen, C. Zhu, B. Bao, C. Luo, Y. Zhang // Chemical Geology. 2023. Vol. 634. P. 121571 DOI: https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2023.121571
- 16. Hajihashemi S., Rajabpoor S., Schat H. Acid mine drainage (AMD) endangers pomegranate trees nearby a copper mine // Science of The Total Environment. – 2023. – Vol. 889. – P. 164269. DOI: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164269

- 17. Артамонова В.С., Бортникова С.Б., Хусаинова А.Ш. Бактерии и водоросли участники первичного почвообразования на отходах переработки полиметаллических руд // Экология и геохимическая деятельность микроорганизмов экстремальных местообитаний: Материалы III Всероссийской конференции с международным участием, посвященной 80-летию д.б.н., проф. Б.Б. Намсараева, 100-летию Республики Бурятия, 300-летию Российской академии наук. Новосибирск, 2023. С. 10–11.
- 18. Артамонова С.В., Калиев А.Ж. Факторы техногенного преобразования природных компонентов на Гайском месторождении // Вестник Оренбургского государственного университета. 2011. № 12 (131). С. 372–373.
- 19. Определение элементного гомеостаза детского населения Забайкальского края методом многоэлементного инструментального нейтронно-активационного анализа / Л.А. Михайлова, Н.В. Барановская, Е.А. Бондаревич, Ю.А. Витковский, Е.С. Эпова, О.В. Ерёмин, Б.В. Нимаева, Е.В. Агеева // Гигиена и санитария. 2023. Т. 102. № 2. С. 123–131.
- Mketo N., Nomngongo Ph.N., Ngila J.C. An innovative microwave-assisted digestion method with diluted hydrogen peroxide for rapid extraction of trace elements in coal samples followed by inductively coupled plasma-mass spectrometry // Microchemical Journal. – 2016. – Vol. 124. – P. 201–208. DOI: https://doi.org/10.1016/j.microc.2015.08.010
- 21. Ferrer F.M., Dold B., Jerez O. Dissolution kinetics and solubilities of copper sulfides in cyanide and hydrogen peroxide leaching: Applications to increase selective extractions // Journal of Geochemical Exploration. – 2021. – Vol. 230. – P. 106848. DOI: https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2021.106848
- 22. Tungsten extraction from scheelite hydrochloric acid decomposition residue by hydrogen peroxide / L. Xiao, L. Ji, Ch. Yin, A. Chen, X. Chen, X. Liu, J. Li, L. He, F. Sun, Zh. Zhao // Minerals Engineering. 2022. Vol. 179. P. 107461. DOI: https://doi.org/10.1016/j.mineng.2022.107461
- Technospheric mining of critical and strategic metals from nickel slag Leaching with citric acid and hydrogen peroxide / B. Lim, M. Aylmore, D. Grimsey, R.D. Alorro // Hydrometallurgy. – 2023. – Vol. 219. – P. 106066. DOI: https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2023.106066
- Aydoğan S., Motasim M., Ali B. The novelty of silver extraction by leaching in acetic acid with hydrogen peroxide as an organic alternative lixiviant for cyanide // Heliyon. – 2024. – Vol. 10. – Iss. 2. – P. e24784. DOI: https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e24784
- Microwave-assisted extraction of rare earth elements from phosphogypsum-Effect of hydrogen peroxide addition / L.N. Widjaja, J. Lie, F.E. Soetaredjo, J.-Ch. Liu // Chemical Engineering and Processing – Process Intensification. – 2024. – Vol. 200. – P. 109800 DOI: https://doi.org/10.1016/j.cep.2024.109800
- 26. Михайлов А.Н., Овсейчук В.А. Влияние различных реагентов на эффективность подземного скважинного выщелачивания урана из руд Хиагдинского месторождения // Вестник ЗабГУ. 2022. Т. 28. № 4. С. 16–27.
- 27. What chemical reaction dominates the CO2 and O2 in-situ uranium leaching? Insights from a three-dimensional multicomponent reactive transport model at the field scale / W. Qiu, Y. Yang, J. Song, W. Que, Z. Liu, H. Weng, J. Wu, J. Wu // Applied Geochemistry. 2023. Vol. 148. P. 105522. DOI: https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2022.105522
- Baran V., Škvor F., Voseček V. Formation of the ammonium-uranyl-carbonate complexes of the type (NH4)4[UO2(CO3)3], prepared by precipitative re-extraction // Inorganica Chimica Acta. – 1984. – Vol. 81. – P. 83–89. DOI: https://doi.org/10.1016/S0020-1693(00)88739-3
- Alguacil F.J., Navarro P. Non-dispersive solvent extraction of Cu(II) by LIX 973N from ammoniacal/ammonium carbonate aqueous solutions // Hydrometallurgy. 2002. Vol. 65. Iss. 1. P. 77–82. DOI: https://doi.org/10.1016/S0304-386X(02)00093-2
- 30. Selective leaching of vanadium in calcification-roasted vanadium slag by ammonium carbonate / H.-Y. Li, K. Wang, W.-H. Hua, Zh. Yang, W. Zhou, B. Xie // Hydrometallurgy. 2016. Vol. 160. P. 18–25. DOI: https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2015.11.014
- Scheelite conversion in sulfuric acid together with tungsten extraction by ammonium carbonate solution / X. Li, L. Shen, Q. Zhou, Z. Peng, G. Liu, T. Qi // Hydrometallurgy. – 2017. – Vol. 171. – P. 106–115. DOI: https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2017.05.005
- 32. Highly efficient diluent-free solvent extraction of uranium using mixtures of protonated trioctylamine and quaternary ammonium salts. Comparative Life Cycle Assessment with the conventional extractant / E. Guerinoni, S. Dourdain, Z. Lu, F. Giusti, G. Arrachart, J. Couturier, D. Hartmann, S. Pellet-Rostaing // Hydrometallurgy. 2024. Vol. 224. P. 106257. DOI: https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2023.106257
- 33. Роль атмосферных выпадений в процессах криогенеза в зонах окисления сульфидных месторождений / А.Б. Птицын, Т.И. Маркович, В.А. Павлюкова, Е.С. Эпова // Вестник СВНЦ ДВО РАН. 2005. № 1. С. 33–35.
- 34. Эпова Е.С., Юргенсон Г.А., Ерёмин О.В. Экспериментальное моделирование процессов выщелачивания руд месторождения Любовь (Забайкалье) // Доклады Академии наук. 2019. Т. 486. № 4. С. 469–474.
- 35. Эпова Е.С. Криогеохимия зоны окисления сульфидного месторождения Удокан (Восточное Забайкалье) // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 5. С. 553. URL: https://science-education.ru/ru/article/view?id=10745 (дата обращения 20.05.2024).

#### Информация об авторах

**Екатерина Сергеевна Эпова**, кандидат геолого-минералогических наук, младший научный сотрудник, лаборатория геохимии и рудогенеза, Институт природных ресурсов, экологии и криологии Сибирского отделения Российской академии наук, Россия, 672002 г. Чита, а/я 1032; https://orcid.org/0000-0002-5670-6809; apikur1@ya.ru

**Георгий Александрович Юргенсон**, доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник, лаборатория геохимии и рудогенеза, Институт природных ресурсов, экологии и криологии Сибирского отделения Российской академии наук, Россия, 672002 г. Чита, а/я 1032; https://orcid.org/0000-0002-7818-7528; yurgga@mail.ru

**Олег Вячеславович Еремин**, кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник, лаборатория геохимии и рудогенеза, Институт природных ресурсов, экологии и криологии Сибирского отделения Российской академии наук, Россия, 672002 г. Чита, а/я 1032; https://orcid.org/0000-0002-0849-4557; yeroleg@yandex.ru

Поступила в редакцию: 24.05.2024 Поступила после рецензирования: 06.06.2024 Принята к публикации: 02.04.2025

#### REFERENCES

- 1. Yurgenson G.A., Yurgenson T.N. Darasun ore field. *Deposits of Transbaikalia*. Vol. 1. B. 2. Moscow, Geoinformmark Publ., 1995. pp. 4–15. (In Russ.)
- 2. Thomas G., Sheridan C., Holm P.E. Arsenic contamination and rare earth element composition of acid mine drainage impacted soils from South Africa. *Minerals Engineering*, 2023, vol. 203, 108288 p. DOI: https://doi.org/10.1016/j.mineng.2023.108288
- 3. Zwahlen C., Rehn A., Aiglsperger T., Dold B. Geochemical and mineralogical aspects of acid mine drainage associated with 100years of coal mining in the arctic, Svalbard (78°N). *Journal of Geochemical Exploration*, 2023, vol. 252, 107266 p. DOI: https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2023.107266
- Barbero L., Gázquez M.J., Bolívar J.P., Casas-Ruiz M., Hierro A., Baskaran M., Ketterer M.E. Mobility of Po and U-isotopes under acid mine drainage conditions: an experimental approach with samples from Río Tinto area (SW Spain). *Journal of Environmental Radioactivity*, 2014, vol. 138, pp. 384–389. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2013.11.004
- Guerrero J.L., Suárez-Vaz N., Paz-Gómez D.C., Pérez-Moreno S.M., Bolívar J.P. Spatiotemporal evolution of U and Th isotopes in a mine effluent highly polluted by Acid Mine Drainage (AMD). *Journal of Hazardous Materials*, 2023, vol. 447, 130782 p. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.130782
- 6. Nordstrom D.K. Aqueous pyrite oxidation and the consequent formation of secondary iron minerals. *Acid sulfate weathering*, 1982, vol. 3, pp. 37–39.
- 7. Olenchenko V.V., Kucher D.O., Bortnikova S.B., Gaskova O.L., Edelev A.V., Gora M.P. Vertical and lateral distribution of highly mineralized solutions of acidic drainage according to the data of electrotomography and hydrogeochemistry (Ursk dump, Salair). *Geology and Geophysics*, 2016, vol. 57, no. 4, pp. 782–795. (In Russ.)
- 8. Korneeva T.V., Yurkevich N.V., Saeva O.P. Geochemical modeling of heavy metals behavior in technogenic systems. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 3, pp. 89–101. (In Russ.)
- 9. Shadrunova I.V., Samoilova A.S., Orekhova N.N. Regularities of formation of copper-containing effluents at mining enterprises. *Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal)*, 2008, no. 3, pp. 304–311. (In Russ.)
- 10. Zakharova V.Ya., Skvaletsky E.N. Geoecological forecasts of conditions for the development of South Ural copper-coal deposits. *Problems of regional ecology*, 2011, no. 5, pp. 34–37. (In Russ.)
- González-Toril E., Aguilera A., Rodriguez N., Fernández-Remolar D., Gómez F., Diaz E., García-Moyano A., Sanz J.L., Amils R. Microbial ecology of Río Tinto, a natural extreme acidic environment of biohydrometallurgical interest. *Hydrometallurgy*, 2010, vol. 104, Iss. 3–4, pp. 329–333. DOI: https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2010.01.011
- 12. Huang Q., Liu Z., Guo Y., Li B., Yang Z., Liu X., Ni J., Li X., Zhang X., Zhou N., Yin H., Jiang C., Hao L. Coal-source acid mine drainage reduced the soil multidrug-dominated antibiotic resistome but increased the heavy metal(loid) resistome and energy production-related metabolism. *Science of The Total Environment*, 2023, vol. 873, 162330 p. DOI: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162330
- Kuang X., Peng L., Chen Sh., Peng Ch., Song H. Immobilization of metal(loid)s from acid mine drainage by biological soil crusts through biomineralization. *Journal of Hazardous Materials*, 2023, vol. 443, Pt. B, 130314 p. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.130314
- 14. Pan Y., Ye H., Yang Y., Yang C., Li X., Ma T., Dang Z., Lu G. Transport and fate of Cu and Cd in contaminated paddy soil under acid mine drainage. *Journal of Environmental Management*, 2023, vol. 334, 117517 p. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.117517
- Zhou Z., Wen H., Zhu C., Bao B., Luo C., Zhang Y. Effects of lithology and acid mine drainage on Cd concentration and isotope distribution in a large riverine system, Guangxi Province, South China. *Chemical Geology*, 2023, vol. 634, 121571 p. DOI: https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2023.121571
- 16. Hajihashemi S., Rajabpoor S., Schat H. Acid mine drainage (AMD) endangers pomegranate trees nearby a copper mine. *Science of The Total Environment*, 2023, vol. 889, 164269 p. DOI: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164269
- 17. Artamonova V.S., Bortnikova S.B., Khusainova A.Sh. Bacteria and algae participants of primary soil formation on the waste of polymetallic ore processing. Ecology and geochemical activity of microorganisms of extreme habitats. Proc. of the III All-Russian Conference with international participation, dedicated to the 80th anniversary of Dr. B.B. Namsaraev, Prof. B.B. Namsaraev, 100th anniversary of the Republic of Buryatia, 300th anniversary of the Russian Academy of Sciences. Novosibirsk, 2023. pp. 10–11. (In Russ.)
- 18. Artamonova S.V., Kaliev A.J. Factors of technogenic transformation of natural components at the Gaiskoye deposit. *Bulletin of the Orenburg State University*, 2011, no. 12 (131), pp. 372–373. (In Russ.)
- 19. Mikhailova L.A., Baranovskaya N.V., Bondarevich E.A., Vitkovsky Y.A., Epova E.S., Eryomin O.V., Nimaeva B.V., Ageeva E.V. Determination of elemental homeostasis of the child population of the Zabaikalsky Krai by the method of multielement instrumental neutron activation analysis. *Hygiene and sanitation*, 2023, vol. 102, no. 2, pp. 123–131. (In Russ.)
- Mketo N., Nomngongo Ph.N., Ngila J.C. An innovative microwave-assisted digestion method with diluted hydrogen peroxide for rapid extraction of trace elements in coal samples followed by inductively coupled plasma-mass spectrometry. *Microchemical Journal*, 2016, vol. 124, pp. 201–208. DOI: https://doi.org/10.1016/j.microc.2015.08.010
- 21. Ferrer F.M., Dold B., Jerez O. Dissolution kinetics and solubilities of copper sulfides in cyanide and hydrogen peroxide leaching: APPLICATIONS to increase selective extractions. *Journal of Geochemical Exploration*, 2021, vol. 230, 106848 p. DOI: https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2021.106848
- 22. Xiao L., Ji L., Yin Ch., Chen A., Chen X., Liu X., Li J., He L., Sun F., Zhao Zh. Tungsten extraction from scheelite hydrochloric acid decomposition residue by hydrogen peroxide. *Minerals Engineering*, 2022, vol. 179, 107461 p. DOI: https://doi.org/10.1016/j.mineng.2022.107461
- Lim B., Aylmore M., Grimsey D., Alorro R.D. Technospheric mining of critical and strategic metals from nickel slag Leaching with citric acid and hydrogen peroxide. *Hydrometallurgy*, 2023, vol. 219, 106066 p. DOI: https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2023.106066
- 24. Aydoğan S., Motasim M., Ali B. The novelty of silver extraction by leaching in acetic acid with hydrogen peroxide as an organic alternative lixiviant for cyanide. *Heliyon*, 2024, vol. 10, Is. 2, e24784 p. DOI: https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e24784
- 25. Widjaja L.N., Lie J., Soetaredjo F.E., Liu J.-Ch. Microwave-assisted extraction of rare earth elements from phosphogypsum-Effect of hydrogen peroxide addition. *Chemical Engineering and Processing – Process Intensification*, 2024, vol. 200, 109800 p. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cep.2024.109800
- 26. Mikhailov A.N., Ovseichuk V.A. Influence of different reagents on the efficiency of in-situ borehole leaching of uranium from ores of Khiagda deposit. *Bulletin of ZabGU*, 2022, vol. 28, no. 4, pp. 16–27. (In Russ.)
- 27. Qiu W., Yang Y., Song J., Que W., Liu Z., Weng H., Wu J., Wu J. What chemical reaction dominates the CO<sub>2</sub> and O<sub>2</sub> in-situ uranium leaching? Insights from a three-dimensional multicomponent reactive transport model at the field scale. *Applied Geochemistry*, 2023, vol. 148, 105522 p. DOI: https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2022.105522
- Baran V., Škvor F., Voseček V. Formation of the ammonium-uranyl-carbonate complexes of the type (NH<sub>4</sub>)<sub>4</sub>[UO<sub>2</sub>(CO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>], prepared by precipitative re-extraction. *Inorganica Chimica Acta*, 1984, vol. 81, pp. 83–89. DOI: https://doi.org/10.1016/S0020-1693(00)88739-3
- 29. Alguacil F.J., Navarro P. Non-dispersive solvent extraction of Cu(II) by LIX 973N from ammoniacal/ammonium carbonate aqueous solutions. *Hydrometallurgy*, 2002, vol. 65, Iss. 1, pp. 77–82. DOI: https://doi.org/10.1016/S0304-386X(02)00093-2
- 30. Li H.-Y., Wang K., Hua W.-H., Yang Zh., Zhou W., Xie B. Selective leaching of vanadium in calcification-roasted vanadium slag by ammonium carbonate. *Hydrometallurgy*, 2016, vol. 160, pp. 18–25. DOI: https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2015.11.014
- 31. Li X., Shen L., Zhou Q., Peng Z., Liu G., Qi T. Scheelite conversion in sulfuric acid together with tungsten extraction by ammonium carbonate solution. *Hydrometallurgy*, 2017, vol. 171, pp. 106–115. DOI: https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2017.05.005
- 32. Guerinoni E., Dourdain S., Lu Z., Giusti F., Arrachart G., Couturier J., Hartmann D., Pellet-Rostaing S. Highly efficient diluentfree solvent extraction of uranium using mixtures of protonated trioctylamine and quaternary ammonium salts. Comparative Life Cycle Assessment with the conventional extractant. *Hydrometallurgy*, 2024, vol. 224, 106257 p. DOI: https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2023.106257
- 33. Ptitsyn A.B., Markovich T.I., Pavlyukova V.A., Epova E.S. Role of atmospheric deposition in the processes of cryogenesis in oxidation zones of sulfide deposits. *Vestnik of the North-Eastern Scientific Centre of the FEB RAS*, 2005, no. 1, pp. 33–35. (In Russ.)
- 34. Epova E.S., Yurgenson G.A., Eremin O.V. Experimental simulation of processes of ore leaching from Lyubov deposit (Transbaikalian region). *Doklady Earth Sciences*, 2019, vol. 486, no. 2, pp. 647–650. DOI: https://doi.org/10.1134/S1028334X19060023 (In Russ.)
- 35. Epova E.S. Cryogeochemistry of the oxidation zone of the sulfide deposit Udokan (Eastern Transbaikalia). *Modern Problems of Science and Education*, 2013, no. 5, 553 p. (In Russ.) Available at: https://science-education.ru/ru/article/view?id=10745 (accessed 20 May 2024).

#### Information about the authors

**Ekaterina S. Epova**, Cand. Sc., Junior Researcher, Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, P.O. Box 1032, Chita, 672002, Russian Federation; https://orcid.org/0000-0002-5670-6809; apikur1@ya.ru

**Georgiy A. Yurgenson**, Dr. Sc., Chief Scientific Researcher; Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, P.O. Box 1032, Chita, 672002, Russian Federation; https://orcid.org/0000-0002-7818-7528; yurgga@mail.ru

**Oleg V. Eremin**, Cand. Sc., Research Associate, Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, P.O. Box 1032, Chita, 672002, Russian Federation; https://orcid.org/0000-0002-0849-4557; yeroleg@yandex.ru

Received: 24.05.2024 Revised: 06.06.2024 Accepted: 02.04.2025 UDC 550.8.08 DOI: 10.18799/24131830/2025/5/4723 Scientific paper

## The porosity and nuclear magnetic characteristics of artificial samples with the equal grain size

T.A. Yanushenko<sup>1,2⊠</sup>, N.A. Golikov<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup> Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation <sup>2</sup> Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Siberian Branch Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation <sup>3</sup> Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russian Federation

<sup>™</sup>YanushenkoTA @ipgg.sbras.ru

Abstract. Relevance. The nuclear magnetic resonance relaxometry is a fairly new method for well logging and laboratory investigations. It is applied for determining petrophysical properties, e.g., porosity, permeability, water- and oil-saturation. However, the nuclear magnetic resonance relaxometry data interpretation rests on the representation of the pore space as a set of spheres of various diameters that fundamentally does not correspond to the structure of granular rocks. Aim. To examine an influence of grain size on the measurements results of nuclear magnetic resonance relaxometry porosity and compare with other conventional methods. Objects. Artificial samples made with various sand and quartz glass beads fractions. *Methods.* Water-saturation, gas-volumetric and nuclear magnetic resonance relaxometry were applied to determine porosity. X-ray diffraction method was used to clarify the mineralogical composition; to measure the grain size a laser particle size analyzer was used, and the grain shape was investigated in polished specimens. Results. The paper describes the results of porosity measurements with different methods for artificial samples. We observed an effect of underestimated porosity acquired with nuclear magnetic resonance relaxometry method for consolidated and unconsolidated samples with grain size less than 0.160 mm. The investigation of sand composition with the X-ray diffraction method and additional assessment of the particles shape and size led to conclude that these factors are not the cause of the underestimated porosity effect. Additional statistical samples and using of the other nuclear magnetic resonance relaxometer presented the reparability of previous results. Based on the research results, it was assumed that the cause of the underestimated porosity effect is the complex shape and increased specific surface area of the samples, which grows as the particle size decreases.

**Keywords:** porosity, grain size, artificial samples, petrophysical properties, nuclear magnetic resonance relaxometry, gasvolumetric method, water-saturating method

**Acknowledgements:** The research was carried out within the framework of the state assignment of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation, the project FWZZ-2022-0026.

**For citation:** Yanushenko T.A., Golikov N.A. The porosity and nuclear magnetic characteristics of artificial samples with the equal grain size. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 5, pp. 110–119. DOI: 10.18799/24131830/2025/5/4723

УДК 550.8.08 DOI: 10.18799/24131830/2025/5/4723 Шифр специальности ВАК: 1.6.9 Научная статья

# Пористость и ядерно-магнитные характеристики искусственных образцов с одинаковым размером зерен

Т.А. Янушенко<sup>1,2⊠</sup>, Н.А. Голиков<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup> Новосибирский Государственный университет, Россия, г. Новосибирск <sup>2</sup> Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук, Россия, г. Новосибирск <sup>3</sup> Новосибирский Государственный Технический Университет, Россия, г. Новосибирск

<sup>™</sup>YanushenkoTA @ipgg.sbras.ru

Аннотация. Актуальность. Ядерно-магнитная резонансная релаксометрия является относительно новым методом каротажа и лабораторных исследований. Он применяется для определения петрофизических свойств, например, таких как, пористость, проницаемость, насыщенность водой и нефтью. Однако интерпретация данных ядерномагнитной резонансной релаксометрии подразумевает представление порового пространства как набора сфер различного диаметра, что не соответствует структуре терригенных пород. Целью исследования было изучение влияния размера зерна на результаты измерения пористости ядерно-магнитной резонансной релаксометрией и сопоставление с другими стандартными методами. Объектом исследования являются искусственные образцы из различных фракций песка и стеклянных кварцевых шариков. Методы. Для определения пористости применяли метод жидкостенасыщения, газоволюметрический метод и ядерно-магнитную резонансную релаксометрию. Рентгенофазовый метод использовался для уточнения минералогического состава; для оценки размера зерен применялся лазерный анализатор размеров частиц, форма зерен исследовалась в шлифах. Результаты. Описаны результаты измерений пористости различными методами на искусственных образцах. Мы наблюдали эффект занижения пористости, измеренный методом ЯМР для консолидированных и неконсолидированных образцов с размером зерна менее 0,160 мм. Исследование состава песка рентгенофазовым методом и дополнительная оценка формы и размера зерен позволили сделать вывод, что эти факторы не являются причиной данного эффекта. Дополнительные статистические выборки и использование другого ЯМР-релаксометра подтвердили повторяемость предыдущих результатов. По результатам исследований сделано предположение, что причиной эффекта занижения пористости является сложная форма и повышенная удельная поверхность зерен образцов, которая увеличивается с уменьшением размера зерен.

**Ключевые слова:** пористость, размер зерен, искусственные образцы, петрофизические свойства, ядерно-магнитная резонансная релаксометрия, газоволюметрический метод, метод жидкостенасыщения

**Благодарности:** Исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства образования и науки Российской Федерации, проект FWZZ-2022-0026.

**Для цитирования:** Янушенко Т.А., Голиков Н.А. Пористость и ядерно-магнитные характеристики искусственных образцов с одинаковым размером зерен // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 5. – С. 110–119. DOI: 10.18799/24131830/2025/5/4723

#### Introduction

The filtration and capacitance properties of rocks are an important object of study in the design and development of oil and gas fields. Quantitative assessment of properties such as porosity, permeability, saturation, allows you to decide on the feasibility of creation of a well. Today there are many logging and laboratory methods that have their advantages and disadvantages. One of these is the method of nuclear magnetic resonance (NMR) relaxometry.

The NMR relaxometry method is a relatively new method for studying petrophysical properties of core samples and drill cuttings. The first borehole measurements were carried out in 1960. Further development of technologies that increase the resolution and sensitivity of instruments has made it possible to develop the NMR relaxometry method in our time [1, 2].

Reservoir properties are known to be determined by the structure of the pore space for terrigenous rocks. It depends on the shape and size of the grains composing these rocks. The NMR relaxometry method makes it possible to evaluate not only such petrophysical properties as porosity [3, 4], permeability [1], water and oil saturation, but also the structure of the pore space [5–7] – the size of the sample pores. However, the data interpretation model assumes pores in the form of spherical or cylindrical inclusions, which is inadequate model true. In addition, it is believed that the NMR relaxometry method depends only on the properties of the fluid saturating the rock and is limited by the sensitivity of the instrument [1, 8].

In work [9], we found an underestimated porosity effect using the NMR relaxometry method for artificial sand samples in comparison with other conventional methods. Furthermore, we examined the maximum of the transverse relaxation time and their shifting after the creation of residual water saturation:

- average displacement is 455 ms (with an average maximum of 517 ms) for samples of the large fraction;
- average displacement is 134 ms (with an average maximum of 183 ms) for samples of the medium fraction;
- average offset is 33 ms (with an average maximum of 40 ms) for samples of the fine fraction.

In foreign and Russian sources, no mention was found of the underestimated porosity effect with the NMR relaxometry method in fine-grained and silty samples. Conversely, many studies indicate a good correlation of this method with conventional methods for determination of porosity [3, 4, 10], including for fine-grained fractions [11, 12]. At the same time, researchers note the need to consider surface relaxivity [13] and clay content during studying with NMR, since it affects not only the echo signal, but also the spectrum of time distribution [14–16]. The work [17] describes a shift in relaxation times towards their decrease due to an increase in the clay content of artificial samples consisting of sand and clay material. All these works are united by the conclusion about the importance of the specific surface area during studying core samples.

## Materials and methods

## The samples collections

We used petrophysical methods (liquid saturation, gas-volumetric and nuclear magnetic resonance relaxometry) for three suites of sample collections – artificial consolidated sand samples, artificial unconsolidated sand samples and artificial unconsolidated quartz glass beads samples.

To create collections of sand samples ordinary river sand was used. This sand was dried with oven and sifted with a sieving machine. As a result, we had got 11 fractions with grain size ranging 1–0.040 mm.

To create consolidated samples, the mixture of different granulometric sand compositions with cryogel (10% solution of polyvinyl alcohol) was used. Cryogel is an aqueous solution of polyvinyl alcohol, which has the ability to transform from a viscous flow state into structured elastic bodies. This gradual transformation is conducted by passing through freeze-thaw cycles through a threshold value of 0°C. Using an empirical method, it was found that five cycles are enough to consolidate sand. Currently, cryogel is used mainly in the conditions of the Far North to strengthen road slopes [18], soils [19], as well as in the construction of structures and pipelines in the arctic regions [20].

To create the samples, cylindrical forms with a diameter and length of ~3 cm were used so that the volume of the samples was close to the volume of standard core samples and a calibration sample for NMR measurements. The cryogel volume was about 35% of the volume of the form. The mixture was stirred until a homogeneous mass, after which it was laid out in layers in the form. With each portion, sand and cryogel had to be compacted to avoid the formation of voids and air bubbles. Then the samples went through five freeze-thaw cycles and were dried. According to standard methods for measuring porosity and permeability using the gas-volumetric method with a porosimeter, the ends of the samples under study must be smooth and strictly perpendicular to the sides of the samples. Therefore, the ends of the samples were worked up with a grinding machine. The number of samples of each fraction and their characteristics are presented in Table 1.

For unconsolidated samples, fluoroplastic cylindrical forms (with volume  $\sim 15 \text{ cm}^3$ ) were designed and made. The paper filter (cell size is 8–12 micrometers) on the end of this forms helped to avoid spilling sand out and allow sand saturation. To achieve better sand compressibility and prevent high porosity due poor packing, sand was mixed with water in an amount of 35% of the volume of the form. Then, the mixture was placed into the form in layers and compacted to avoid the forming of air bubbles and voids. The samples were subsequently dried and prepared for further measurements. The unconsolidated samples characteristics are shown in Table 2.

Table 1.	Consolidated samples characteristics
Таблица 1.	Характеристики консолидированных образцов

, ,		1 1 ,
Fraction size, mm Размер фрак-	Fraction name Название фракции	Number of samples in collection Количество образцов
ции, мм		в коллекции
1-0.630	Coarse-grained sand Крупнозернистый песок	3
0.630-0.315	Coarse- and medium- grained sand Крупно- среднезернистый песок	3
0.315-0.250	Medium-grained sand Среднезернистый песок	3
0.250-0.200		3
0.200-0.160	Fine-grained sand	3
0.160-0.125	мелкозернистыи	4
0.125-0.100	HECOK	3
0.100-0.063	Silt (very fine-grained	3
0.063-0.050	sand)	3
0.050-0.040	Алевриты	2

 Table 2.
 Unconsolidated samples characteristics

**Таблица 2.** Характеристики неконсолидированных образцов

Sample no. Номер образца	Fraction size, mm Размер фракции, мм	Fraction name Название фракции	
1	1-0.630	Coarse-grained sand Крупнозернистый песок	
2	0.630-0.315	Coarse- and medium- grained sand Крупно- среднезернистый песок	
3	0.315-0.250	Medium-grained sand Среднезернистый песок	
4	0.250-0.200		
5	0.200-0.160	Fine-grained sand	
6	0.160-0.125	Мелкозернистый песок	
7	0.125-0.100		
8	0.100-0.063	Silt (very fine-grained	
9	0.063-0.050	sand)	
10	0.050-0.040	Алевриты	

To examine references consisting of smooth spherical grains, quartz glass beads of different granulometric compositions were used. Since it was necessary to explore only porosity using the NMR and gravimetric methods, jars with a volume close to the calibration NMR sample were used. To compare the results, the same samples were examined, but consisting of grains of sand, which made up the structure of the pore space from non-smooth grains of different non-ideal shapes. The samples were saturated according to standard methods under vacuum [21]. Then, the samples were ready for porosity measurements with the NMR relaxometry method. Table 3 shows the sand and quartz glass fractions that overlapped and were compared with each other.

Table 3.	Fractions of quartz glass beads and correspond-
	ing sand fractions

Таблица З.	Фракции	кварцевого	стекла	и	соответству-
	ющие им	фракции пе	ска		

	-			
Fraction sizes of samples	Fraction sizes corresponding			
with quartz glass beads	sand samples			
Размер фракции образцов из	Размеры фракций, соответ-			
шариков кварцевого стекла	ствующие песчаным образцам			
тт/мм				
0.500-0.600	0.315-0.630			
0.350, 0.500	0.315-0.630			
0.250-0.500	0.250-0.315			
	0.200-0.250			
0.100, 0.250	0.160-0.200			
0.100-0.250	0.125-0.160			
	0.100-0.125			
0.070-0.110	0.063-0.100			
0.063-0.073	0.063-0.100			
0.040, 0.070	0.050-0.063			
0.040-0.070	0.040-0.050			
0.000-0.050	0.040-0.050			

#### Nuclear magnetic resonance relaxometry

Nuclear magnetic resonance rest on the reaction of atomic nuclei to an external magnetic field. Due to the presence of a magnetic moment and spin in the nuclei, they precess around the vector of the acting magnetic field. Therefore, when exposed to an external magnetic field, these precessing magnetic nuclei can produce signals that can be measured [1].

According to the theory, NMR measurements can be carried out on any nuclei with an odd number of protons and neutrons. These include a hydrogen, carbon, sodium. For the most nuclei found in terrestrial formations, the nuclear magnetic signal induced by the external magnetic fields is small. However, hydrogen (which has only one proton) allows observing a fairly strong signal due to its relatively large magnetic moment and wide distribution in fluids saturating rocks [22].

The NMR experiment and obtaining the relaxation curve can be divided into three stages:

- sample magnetization over a period of time Tw by exposure to a constant magnetic field B<sub>0</sub>(T<sub>1</sub> time);
- turning of the macroscopic magnetization vector M<sub>0</sub> into a transverse plane perpendicular to vector B<sub>0</sub> using a 90° pulse of alternating magnetic field B<sub>1</sub>;

• learning the relaxation curve as a result of applying a sequence of 180° pulses supplied at TE time intervals (T<sub>2</sub> time).

There are relationships between petrophysical properties and NMR characteristics. Three processes are involved in relaxation of fluids located in the pore space of rocks [1]:

- Volumetric processes in fluids affecting T<sub>1</sub> and T<sub>2</sub>. It depends on chemical and physical properties of saturating fluid.
- Surface relaxation affecting T<sub>1</sub> and T<sub>2</sub>. It depends on a pore space – special surface area – and relaxivity parameter depending on mineralogical composition.
- Diffusion in the presence of magnetic field gradients affecting T<sub>2</sub>. It depends on NMR instrument.

In our case we examined only  $T_2$  time – transverse relaxation time. Since we used the same saturating fluid and the same NMR instrument without magnetic field gradient, we can assume that NMR characteristics depends only the surface relaxation phenomena [23]:

$$\frac{1}{T_{2 \text{ surface}}} = \rho_2 * \left(\frac{S}{V}\right)_{\text{pore}},$$
 (1)

where  $T_2$  surface is the transverse relaxation time of the pore fluid associated with relaxation on the grain surface;  $\rho_2$  is the surface relaxivity; S/V is the pore surface area to the pore volume ratio (the specific surface area).

From formula (1) it follows that in large pores a small S/V ratio leads to increase in relaxation times. Conversely, in small pores this ratio is high, and therefore relaxation times are shorter. A detailed illustration is presented in the Fig. 1. As can be seen from point A, the smaller the pore filled with fluid becomes, the faster the relaxation curve decays, which means the transverse relaxation time also shifts towards decreasing times. If we consider different pore simultaneously, then the relaxation curve is a combination of all pores separately. This fact is used in mathematical processing.

#### Water-saturation method

The water saturation method [21] is applied for determining the porosity coefficient. It is based on measuring the sample mass in air and the saturating fluid (in our case – water). Initially, the samples are dried and weighed in air ( $M_1$ ). Then, they are saturated with water under the vacuum created by a pump for several days and weighed in air ( $M_2$ ). Finally, mass in the fluid gives a summand  $M_3$ . The porosity coefficient is known to be the pore volume to the sample volume ratio and it can be calculated from (2):

$$\varphi = \frac{M_3 - M_1}{M_3 - M_2} * 100\%.$$
 (2)



Fig. 1. Form of a relaxation curve and transverse relaxation time  $T_2$  depending on a pore size: A) separately; B) in combination [23]

**Рис. 1.** Вид релаксационной кривой и времени поперечной релаксации T<sub>2</sub> в зависимости от размера пор: A) по отдельности; B) в комбинации [23]

#### Gas-volumetric method

The gas-volumetric method is based on the Boyle– Marriotte's Law. It describes the relationships between pressure and volume of a confined gas with a constant temperature [24] (3). Before an experiment the instrument need a calibration. Specific metallic sample is placed into the camera and compressed with a rubber coupling to eliminate gas leak. Therefore, we get P<sub>1</sub> and V<sub>1</sub>. Then, an investigated sample is put into the camera to get P<sub>2</sub> and V<sub>2</sub> after reaching pressure equilibrium. The result volume consists of the calibration volume and the pore volume. In the research we used the porosimeter "AP-608".

$$P_1 * V_1 = P_2 * V_2 . (3)$$

#### **Results and discussion**

In [9] we found a phenomena during porosity measurements with the NMR relaxometry method of collection artificial sand samples consolidated with cryogel. For the samples with grain size less than 0.200 mm porosity acquired with saturation and gasvolumetric methods distinguish from NMR. Firstly, to prevent an influence of cryogel, we examined porosity of unconsolidated samples consisted of the same sand fractions. The measurement results are showed in Fig. 2. There is a decrease in porosity towards the reduce of grain size less than 0.160 mm.



Fig. 2. Porosity of the unconsolidated samples measured with various methods

Рис. 2. Пористость неконсолидированных образцов, измеренная разными методами

The difference between the NMR porosity and the gas-volumetric porosity is about 22% for samples with the grain size more than 0.160 mm and 80% for the samples with the grain size less than 0.160 mm. In the previous research this difference was 30 and 70%, respectively.

Further examining of the underestimated porosity effect led to the study of the particle size and lithological composition of sand fractions. Fractions sizes yielded during sieving were confirmed with the laser diffraction method. Median and average grain sizes correspond to the fraction sizes ranges. The study of sand polished specimens with an electron microscope allowed considering grain forms. The shape of the grains changes from rounded to angular as the size decreases. This is consistent with theory described in [25, 26].

It was established with X-ray diffraction method that quartz significantly predominates in all sand fractions. Plagioclase and potassium feldspar are present in subordinate amounts. In addition, chlorite, dolomite, calcite, mica were like impurities. Finally, there are no magnetic minerals in the sand.

Quartz glass beads samples have a pore space structure where the shape of each grain is close to spherical, in contrast with sand samples with rough and irregularly shaped grains. The effect of underestimated porosity with the NMR relaxometry method was not detected on model samples (Fig. 3). In addition, the results are in good agreement with the weight method (an average difference is 5%). For the same bulk sand samples made using the method described in section Materials and methods the effect of underestimated porosity with the NMR was detected for samples with grain sizes less than 0.160 mm. The difference from the gravimetric method is on average 80%. For the samples larger than 0.160 mm, this difference between two methods is on average 10%. Since cryogel has no effect on porosity studies, the next collection of samples was consolidated with cryogel due to the work convenience. There were an average of three samples per fraction (Table 1). The main goal of creation of this collection is to increase the amount of statistical material and see the repeatability of the effect.

The results of examining the porosity of these samples showed the repeatability of the effect of underestimation of values with the NMR relaxometry method for samples of fine-grained and silty fractions (Fig. 4). The errors shown in the figure reflect the difference in values from sample to sample within the same fraction. The difference in the porosity values according to the gas-volumetric and NMR relaxometry methods for samples with grain sizes larger 0.160 mm was on average 21%, for samples smaller than 0.160 mm – on average 80%.

Thus, the studies showed the repeatability of the results obtained in the previous works. In all sample collections, the effect of underestimated porosity with the NMR relaxometry method was detected, in contrast to the gas-volumetric method and the water-saturation method. The difference in values is  $76\pm5\%$  for samples with a grain size less than 0.160 mm and  $25\pm5\%$  for samples with a grain size greater than 0.160 mm.

Experiments were carried out with other NMR relaxometry with working frequency 12 MHz (the previous NMR instrument had working frequency 2.2 MHz) to ensure that the used instrument did not affect the results. The experiments were carried out on the existing samples. It can be seen that the behavior of the curve for the new NMR instrument is similar for particles with a particle size less than 0.160 mm (Fig. 5). For the rest, there is a good comparison with conventional methods.



Fig. 3. Comparison of the porosity with weight method and NMR relaxometry method for the quartz glass beads samples Puc. 3. Сопоставление пористости по весовому методу и методу ЯМР релаксометрии для образцов из шариков кварцевого стекла



Fig. 4. Porosity of the consolidated samples measured with various methods Puc. 4. Пористость консолидированных образцов, измеренная разными методами

Exploration of the shift of the maximum transverse relaxation times of saturated samples with water after centrifugation at a speed of 2500 rpm showed that:

- average offset is 362 ms (with an average maximum of 565 ms) for coarse samples. In previous work it was 455 ms;
- average offset is 149 ms (with an average maximum of 191 ms) for the medium fraction samples. In previous work it was 134 ms;
- average offset is 27 ms (with an average maximum of 30 ms) for fine samples. In previous work it was 33 ms.
- All of the above allows us to draw some conclusions. To exclude the cryogel impact on porosity measured with NMR, the unconsolidated collection of samples were created. The results demonstrate the repeatability of the underestimated porosity effect. Hence, the cryogel was not the reason of this effect. The same result was acquired on the additional collection. It helped to ensure the repeatability of the results.



*Fig. 5.* Results of porosity measurements with two NMR instruments (the blue line – 12 MHz; the orange line – 2.2 MHz) and matching with conventional methods

**Рис. 5.** Результаты измерения пористости двумя ЯМР приборами (синяя линия – 12 МГц; оранжевая линия – 2,2 МГц) и сопоставление со стандартными методами

The examining of the mineralogical composition of sand, the size and shape of grains demonstrated constancy of the composition. All fractions have the same kinds of minerals. The shape of the grains changes from rounded to angular as the size decreases. Moreover, angular grains have the high specific surface area. This is consistent with theory described in [25, 26]. According to Formula (1) the specific surface area affects directly the NMR measurements. This is indirectly confirmed by the works [14, 17]. They demonstrated the impact of the amount of a clay material and its mineralogical composition on the NMR characteristics. In our case, we assume the constancy of the clay kind because of the using the different fractions of the same sand.

The indirect additional evidences of the influence of the specific surface area are:

- measurements result with the NMR of collections samples created with quartz glass beads. The coincidence of NMR and the gravimetric method allow assuming that the quartz glass beads have small specific surface area because of spherical grain shape without any angular biases;
- repeatability of the results of the carried out measurements on the additional NMR instrument. Furthermore, it confirms the initial NMR instrument was not the reason of the effect of underestimated porosity.

#### Conclusion

The investigations were aimed at searching for the dependence of nuclear magnetic characteristics on the size of the grains composing the sample, as well as investigating the reasons for the effect of underestimated porosity values obtained using the NMR relaxometry method in comparison with other methods.

In all sample collections, the effect of underestimated porosity with the NMR relaxometry method was detected, in contrast to the gas-volumetric method and the water-saturation method. The difference in values is  $76\pm5\%$  for samples with a grain size less than 0.160 mm and  $25\pm5\%$  for samples with a grain size greater than 0.160 mm. The repeatability of the results of studying the shift of maximum relaxation time and the effect of underestimated porosity with the NMR relaxometry method was achieved.

After all investigations of possible reasons of the underestimated porosity, we assume that the reason of the underestimated porosity with the NMR relaxometry method is the specific surface area. Unfortunately, due to technical difficulties, we have not yet been able to measure this parameter. In further research, we plan to pay special attention to this and conduct experiments with different amounts of clay material.

#### REFERENCES

- 1. Coates G.R., Xiao L.Z., Prammer M.G. *NMR Logging Principles and Applications*. Houston, Gulf Publishing Company, 1999. 342 p.
- 2. Yuan Y., Rezaee R., Zhou M., Iglauer S. A comprehensive review on shale studies with emphasis on nuclear magnetic resonance (NMR) technique. *Gas Science and Engineering*, 2023, vol. 120, pp. 1–20. DOI: 10.1016/j.jgsce.2023.205163.
- 3. Raznitsyn A.V., Popov N.A. Complex determination of petrophysical properties of productive sediments using the NMR method. *Bulletin of Perm University*, 2020, vol. 19, no. 2. pp. 132–139. (In Russ.) DOI: 10.17072/psu.geol.19.2.132.
- 4. Knapp L.J., Ardakani O.H., Uchida S., Nanjo T., Otomo C., Hattori T. The influence of rigid matrix minerals on organic porosity and pore size in shale reservoirs: Upper Devonian Duvernay Formation, Alberta, Canada. *International Journal of Coal Geology*, 2020, vol. 227, pp. 1–23. DOI: 10.1016/j.coal.2020.103525.
- 5. Pecherin V.N., Elsakov A.B. Study of the structure of the pore space of rocks using nuclear magnetic resonance and "restored pressure" methods. *Resources of the European North. Technologies and economics of development*, 2017, vol. 9, no. 3, pp. 105–112. (In Russ.)
- 6. Yan F., Han D.-H. Effect of pore geometry on Gassmann fluid substitution. *Geophysical Prospecting*, 2015, vol. 64, no. 6, pp. 1575–1587. DOI: 10.1111/1365-2478.12348.
- Elsayed M., Isah A., Hiba M., Hassan A., Al-Garadi K., Mahmoud M., El-Husseiny A., Radwan A. A review on the applications of nuclear magnetic resonance (NMR) in the oil and gas industry: laboratory and field-scale measurements. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 2022, vol. 12, pp. 2747–2784. DOI: 10.1007/s13202-022-01476-3.
- 8. Jafarov I.S., Syngaevsky P.E., Khafizov S.F. Application of the nuclear magnetic resonance method to characterize the composition and distribution of formation fluids. Moscow, Khimiya Publ., 2002. 439 p. (In Russ.)
- 9. Golikov N.A., Yanushenko T.A. Study of the influence of grain size on petrophysical properties and NMR characteristics of artificial samples. *Interexpo Geo-Siberia*, 2021, vol. 2, no. 2, pp. 26–31. (In Russ.) DOI: 10.33764/2618-981X-2021-2-2-6-31.
- 10. Zhu H., Zhong D., Zhang T., Liu G., Yao J., He C. Diagenetic controls on the reservoir quality of fine-grained «tight» sandstones: a case study based on NMR analysis. *Energy & Fuels*, 2018, vol. 32, no. 2. pp. 1612–1623. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.7b03734.
- 11. Zhang N., Zhao F., Guo P., Li J., Gong W., Guo Z., Sun X. Nanoscale pore structure characterization and permeability of mudrocks and fine-grained sandstones in coal reservoirs by scanning electron microscopy, mercury intrusion porosimetry, and low-field nuclear magnetic resonance. *Geofluids*, 2018, vol. 9. pp. 1–20. DOI: 10.1155/2018/2905141.
- 12. Su S., Wang L., Li J., Lu J., Luo Y., Jia J. Research on porosity characterization methods of shale oil reservoirs in Lianggaoshan Formation, Sichuan Basin. *Frontiers in Earth Science*, 2024, vol. 11, pp. 1–13. DOI: 10.3389/feart.2023.1325094.
- 13. Nagel S.M., Strangfeld C., Kruschwitz S. Application of 1H proton NMR relaxometry to building materials a review. *Journal of Magnetic Resonance Open*, 2021, vol. 6, no. 7. pp. 6–7. DOI: 10.1016/j.jmro.2021.100012.
- 14. Shumskayte M.Y., Glinskikh V.N. Experimental study of the dependence of NMR characteristics on the specific surface and electrical resistivity of sandy-silt-clay samples. *Geology and Geophysics*, 2016, vol. 57, no. 10. pp. 1911–1918. (In Russ.) DOI: 10.15372/GiG20161009.

- Fang C., Pan B., Wang Y., Rao Y., Guo Y., Li J. Pore-scale fluid distributions determined by nuclear magnetic resonance spectra of partially saturated sandstones. *Geophysics*, 2019, vol. 84, no. 3, pp. 1–34. DOI: 10.1190/geo2018-0286.1.
- 16. Cui Y., Shikhov I., Li S., Arns C.H. A numerical study of field strength and clay morphology impact on NMR transverse relaxation in sandstones. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2021, vol. 202, pp. 1–14. DOI: 10.1016/j.petrol.2021.108521.
- 17. Osterman G., Sugand M., Keating K., Binley A., Slater L. Effect of clay content and distribution on hydraulic and geophysical properties of synthetic sand-clay mixtures. *Geophysics*, 2019, vol. 84, no. 4, pp. 1–65. DOI: 10.1190/geo2018-0387.1.
- Fufaeva M.S., Altunina L.K., Manzhai V.N., Ovsyannikova V.S., Filatov D.A. Cryogels for the formation of an impervious layer and strengthening of road slopes in the northern regions. *North of Russia: strategies and development prospects. Materials of the II All-Russian scientific and practical conference*. Surgut, May 27, 2016. Surgut, Surgut State University, 2016. pp. 128–133. (In Russ.)
- 19. Shiparev R.G., Stoyanovich G.M., Makarenko A.S. Increasing the strength characteristics of sandy soil by cryotropic gelation. *Transport of the Asia-Pacific Region*, 2018, vol. 14, no. 1, pp. 6–9. (In Russ.)
- Altunina L.K., Burkov V.P., Burkov P.V., Dudnikov V.Yu., Osadchaya G.G., Ovsyannikova V.S., Fufaeva M.S. Application of cryogels for solving problems of rational environmental management and operation of main pipeline facilities in the Arctic. *Science and technology of pipeline transport of oil and petroleum products*, 2020, vol. 10, no. 2, pp. 173–185. (In Russ.) DOI: 10.28999/2541-9595-2020-10-2-173-185.
- 21. SS 26450.1-85. *Mountain rocks. Method for determining the coefficient of open porosity with liquid saturation.* Moscow, Gosstandart of the USSR Publ., 1985. 8 p. (In Russ.)
- 22. Schön J.H. Physical properties of rocks: fundamentals and principles of petrophysics. Leoben, Elsevier, 2015. 491 p.
- 23. Gudok N.S., Bogdanovich N.N., Martynov V.G. Determination of the physical properties of oil-containing rocks. Moscow, Nedra-Business Center LLC, 2007. 592 p. (In Russ.)
- 24. Pleshkov L.D., Gubina A.I. *Petrophysics*. Perm, Perm state national researched university Publ., 2019. 90 p. (In Russ.)
- 25. Rukhin L.B. *Fundamentals of lithology. The doctrine of sedimentary rocks.* Ed. by E.V. Rukhina. Leningrad, Nedra Publ., 1969. 703 p. (In Russ.)
- 26. Nedolivko N.M., Ezhova A.V. *Petrographic studies of terrigenous and carbonate reservoir rocks*. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ. house, 2012. 172 p. (In Russ.)

#### Information about authors

**Timofey A. Yanushenko**, Research Engineer, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Akademik Koptyug avenue, Novosibirsk, 630090, Russian Federation; Postgraduate Student, Novosibirsk State University, 1, Pirogov street, Novosibirsk, 630090, Russian Federation. YanushenkoTA@ipgg.sbras.ru; https://orcid.org/0009-0000-7539-6773

**Nikita A. Golikov**, Cand. Sc., Senior Researcher, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Akademik Koptyug avenue, Novosibirsk, 630090, Russian Federation; Senior Lecturer, Novosibirsk State University, 1, Pirogov street, Novosibirsk, 630090, Russian Federation; Associate Professor, Novosibirsk State Technical University, 20, K. Marks avenue, Novosibirsk, 630073, Russian Federation. GolikovNA@ipgg.sbras.ru; https://orcid.org/0000-0001-8101-230X

Received: 30.05.2024 Revised: 11.07.2024 Accepted: 02.04.2025

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Coates G.R., Xiao L.Z., Prammer M.G. NMR Logging Principles and Applications. Houston: Gulf Publishing Company, 1999. – 342 p.
- A comprehensive review on shale studies with emphasis on nuclear magnetic resonance (NMR) technique / Y. Yuan, R. Rezaee, M. Zhou, S. Iglauer // Gas Science and Engineering. – 2023. – Vol. 120. – P. 1–20. DOI: 10.1016/j.jgsce.2023.205163.
- 3. Разницын А.В., Попов А.В. Комплексное определение петрофизических свойств продуктивных отложений методом ЯМР // Вестник пермского университета. – 2020. – Т. 19. – № 2. – С. 132–139. DOI: 10.17072/psu.geol.19.2.132.
- The influence of rigid matrix minerals on organic porosity and pore size in shale reservoirs: Upper Devonian Duvernay Formation, Alberta, Canada / L.J. Knapp, O.H. Ardakani, S. Uchida, T. Nanjo, C. Otomo, T. Hattori // International Journal of Coal Geology. – 2020. – Vol. 227. – P. 1–23. DOI: 10.1016/j.coal.2020.103525.
- 5. Печерин В.Н., Елсаков А.Б. Изучение структуры порового пространства пород методами ядерного магнитного резонанса и «восстановленного давления» // Ресурсы Европейского Севера. Технологии и экономика освоения. 2017. Т. 9. № 3. С. 105–112.
- 6. Yan F., Han D.-H. Effect of pore geometry on Gassmann fluid substitution // Geophysical Prospecting. 2015. Vol. 64. № 6. P. 1575–1587. DOI: 10.1111/1365-2478.12348.
- A review on the applications of nuclear magnetic resonance (NMR) in the oil and gas industry: laboratory and field-scale measurements / M. Elsayed, A. Isah, M. Hiba, A. Hassan, K. Al-Garadi, M. Mahmoud, A. El-Husseiny, A. Radwan // Journal of Petroleum Exploration and Production Technology. – 2022. – Vol. 12. – P. 2747–2784. DOI: 10.1007/s13202-022-01476-3.
- 8. Джафаров И.С., Сынгаевский П.Е., Хафизов С.Ф. Применение метода ядерного магнитного резонанса для характеристики состава и распределения пластовых флюидов. – М.: Химия, 2002. – 439 с.

- 9. Голиков Н.А., Янушенко Т.А. Исследование влияния размера зерен на петрофизические свойства и ЯМР характеристики искусственных образцов // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2021. Т. 2. № 2. С. 26–31. DOI: 10.33764/2618-981X-2021-2-2-26-31.
- Diagenetic Controls on the Reservoir Quality of Fine-Grained «Tight» Sandstones: A Case Study Based on NMR Analysis / H. Zhu, D. Zhong, T. Zhang, G. Liu, J. Yao, C. He // Energy & Fuels. – 2018. – Vol. 32. – № 2. – P. 1612–1623. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.7b03734.
- Nanoscale pore structure characterization and permeability of mudrocks and fine-grained sandstones in coal reservoirs by scanning electron microscopy, mercury intrusion porosimetry, and low-field nuclear magnetic resonance / N. Zhang, F. Zhao, P. Guo, J. Li, W. Gong, Z. Guo, X. Sun // Geofluids. – 2018. – Vol. 9. – P. 1–20. DOI: 10.1155/2018/2905141.
- 12. Research on porosity characterization methods of shale oil reservoirs in Lianggaoshan Formation, Sichuan Basin / S. Su, L. Wang, J. Li, J. Lu, Y. Luo, J. Jia // Frontiers in Earth Science. 2024. Vol. 11. P. 1–13. DOI: 10.3389/feart.2023.1325094.
- 13. Nagel S.M., Strangfeld C., Kruschwitz S. Application of 1H proton NMR relaxometry to building materials a review // Journal of Magnetic Resonance Open. 2021. Vol. 6. № 7. P. 6–7. DOI: 10.1016/j.jmro.2021.100012.
- 14. Шумскайте М.Й., Глинских В.Н. Экспериментальное исследование зависимости ЯМР-характеристик от удельной поверхности и удельного электрического сопротивления песчано-алевритоглинистых образцов // Геология и геофизика. 2016. Т. 57. № 10. С. 1911–1918. DOI: 10.15372/GiG20161009.
- Pore-scale fluid distributions determined by nuclear magnetic resonance spectra of partially saturated sandstones / C. Fang, B. Pan, Y. Wang, Y. Rao, Y. Guo, J. Li // Geophysics. – 2019. – Vol. 84. – № 3. – P. 1–34. DOI: 10.1190/geo2018-0286.1.
- 16. A numerical study of field strength and clay morphology impact on NMR transverse relaxation in sandstones / Y. Cui, I. Shikhov, S. Li, C.H. Arns // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2021. – Vol. 202. – P. 1–14. DOI: 10.1016/j.petrol.2021.108521.
- 17. Effect of clay content and distribution on hydraulic and geophysical properties of synthetic sand-clay mixtures / G. Osterman, M. Sugand, K. Keating, A. Binley, L. Slater // Geophysics. 2019. Vol. 84. № 4. P. 1–65. DOI: 10.1190/geo2018-0387.1.
- 18. Криогели для формирования противофильтрационного слоя и укрепления откосов дорог в северных регионах / М.С. Фуфаева, Л.К. Алтунина, В.Н. Манжай, В.С. Овсянникова, Д.А. Филатов // Север России: стратегии и перспективы развития: материалы II Всероссийской научно-практ. конф. Сургут, 27 мая 2016. Сургут: Сургутский государственный университет, 2016. С. 128–133.
- 19. Шипарев Р.Г., Стоянович Г.М., Макаренко А.С. Повышение прочностных характеристик песчаного грунта криотропным гелеобразованием // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. 2018. Т. 14. № 1. С. 6–9.
- 20. Применение криогелей для решения задач рационального природопользования и эксплуатации объектов магистральных трубопроводов в условиях Арктики / Л.К. Алтунина, В.П. Бурков, П.В. Бурков, В.Ю. Дудников, Г.Г. Осадчая, В.С. Овсянникова, М.С. Фуфаева // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. 2020. Т. 10. № 2. С. 173–185. DOI: 10.28999/2541-9595-2020-10-2-173-185.
- ГОСТ 26450.1-85. Породы горные. Метод определения коэффициента открытой пористости жидкостенасыщением. М.: Изд-во стандартов, 1985. – 8 с.
- 22. Schön J.H. Physical properties of rocks: fundamentals and principles of petrophysics. Leoben: Elsevier, 2015. 491 p.
- 23. Гудок Н.С., Богданович Н.Н., Мартынов В.Г. Определение физических свойств нефтесодержащих пород. М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2007. 592 с.
- 24. Плешков Л.Д., Губина А.И. Петрофизика: Лабораторные работы. Пермь: Перм. гос. нац. исследл. ун-т., 2019. 90 с.
- 25. Рухин Л.Б. Основы литологии. Учение об осадочных породах / под. ред. Е.В. Рухиной. Л.: Недра, 1969. 703 с.
- 26. Недоливко Н.М., Ежова А.В. Петрографические исследования терригенных и карбонатных пород-коллекторов. Томск: Изв-во Томского политехнического университета, 2012. 172 с.

#### Информация об авторах

**Тимофей Александрович Янушенко**, инженер-исследователь, Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3; аспирант кафедры геофизики геолого-геофизического факультета, Новосибирский государственный университет, Россия, 630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 1. YanushenkoTA@ipgg.sbras.ru; https://orcid.org/0009-0000-7539-6773

**Никита Александрович Голиков**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3; старший преподаватель кафедры геологии месторождений нефти и газа, Новосибирский государственный университет, Россия, 630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 1; доцент кафедры геофизических систем, Новосибирский государственный технический университет, Россия, 630073, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. GolikovNA@ipgg.sbras.ru; https://orcid.org/0000-0001-8101-230X

Поступила в редакцию: 30.05.2024 Поступила после рецензирования: 11.07.2024 Принята к публикации: 02.04.2025 УДК 550.812 DOI: 10.18799/24131830/2025/5/5130 Шифр специальности ВАК: 1.6.9 Научная статья

# Проблемы и основные направления развития геологоразведочных работ на нефть и газ в Югре (Ханты-Мансийский автономный округ)

## С.Г. Кузьменков<sup>1</sup>, Г.А. Лобова<sup>2⊠</sup>, О.А. Нанишвили<sup>1</sup>, М.В. Новиков<sup>3</sup>, Л.М. Захарова<sup>4</sup>, В.А. Захарова<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Югорский государственный университет, Россия, г. Ханты-Мансийск

<sup>2</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск

<sup>3</sup> Департамент недропользования и природных ресурсов Ханты-Мансийского автономного округа – Югры, Россия, г. Ханты-Мансийск

<sup>4</sup> Научно-аналитический центр рационального недропользования им. В.И. Шпильмана, Россия, г. Тюмень

#### <sup>⊠</sup>lobovaga@tpu.ru

Аннотация. Актуальность работы подтверждается необходимостью компенсации добычи и поиска возможностей пополнения ресурсов за счет подготовки запасов «новой» нефти. Основной задачей для предприятий топливноэнергетического комплекса Ханты-Мансийского автономного округа – Югры на настоящее время является сохранение добычи нефти на уровне 205-215 млн т в год. Решение этой задачи во многом зависит от увеличения объемов геологоразведочных работ в пределах распределенного и нераспределенного фондов недр. Целью работы является выявления основных направлений наращивания ресурсной базы углеводородного сырья с акцентом на степень геолого-геофизической изученности нефтегазоперспективных земель нераспределенного фонда недр и глубоких (юрского и доюрского) нефтегазоносных комплексов распределенного фонда недр. Методы. Ретроспективный анализ состояния ресурсной базы углеводородного сырья, лицензирования фонда недр, объемов и структуры поисково-разведочного бурения и сейсмических исследований. Результаты и выводы. В результате изучения тематических, аналитических и отчетных материалов нефтедобывающих предприятий. Департамента недропользования Югры и «Научно-аналитического центра рационального недропользования им. В.И. Шпильмана», установлено, что значительная часть используемых исходных данных по сейсморазведке и результатам поисково-разведочного бурения является историческими и требуют значительного объема переобработки и переинтерпретации. Определены закономерные и взаимосвязанные причины «недокомпенсации» добычи приростом запасов «новой» нефти. Рекомендовано проведение тематических работ с целью актуализации исторической геолого-геофизической информации в пределах четырех выделенных нефтепоисковых кластеров на территории нераспределённого фонда недр. Даны рекомендации по подготовке запасов промышленных категорий в юрском и доюрском комплексах в пределах распределенного фонда недр. Выполнение рекомендаций позволит не только существенно нарастить ресурсную базу нефтедобычи, но и способствовать сохранению добычи нефти на плановом уровне.

**Ключевые слова:** распределенный и нераспределенный фонды недр, поисково-разведочное бурение и сейсмические исследования, запасы «новой» нефти, нефтепоисковые кластеры, топливно-энергетический комплекс Ханты-Мансийского автономного округа – Югры

Для цитирования: Проблемы и основные направления развития геологоразведочных работ на нефть и газ в Югре (Ханты-Мансийский автономный округ) / С.Г. Кузьменков, Г.А. Лобова, О.А. Нанишвили, М.В. Новиков, Л.М. Захарова, В.А. Захарова // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 5. – С. 120–131. DOI: 10.18799/24131830/2025/5/5130

UDC 550.812 DOI: 10.18799/24131830/2025/5/5130 Scientific paper

## Oil and gas exploration in Yugra (Khanty-Mansi autonomous okrug): issues and the main development directions

### S.G. Kuzmenkov<sup>1</sup>, G.A. Lobova<sup>2⊠</sup>, O.A. Nanishvili<sup>1</sup>, M.V. Novikov<sup>3</sup>, L.M. Zakharova<sup>4</sup>, V.A. Zakharova<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Yugra State University, Khanty-Mansiysk, Russian Federation <sup>2</sup> National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation <sup>3</sup> Department of Subsurface Management & Natural Resources of Khanty-Mansi Autonomous Okrug – Yugra, Khanty-Mansiysk, Russian Federation <sup>4</sup> Research and Analytical Center for the Rational Use of the Subsoil named after V.I. Shpilman, Tyumen, Russian Federation

#### <sup>⊠</sup>lobovaga@tpu.ru

Abstract. Relevance. The necessity to replenish production volumes and to look for opportunities to increase reserves through preparation of "new" oil reserves. At present, the top priority for the enterprises of the fuel and energy complex based in Khanty-Mansi Autonomous Okrug – Yugra is to maintain oil production at the level of 205–215 million tons a year. The solution of this problem depends largely on the increase in geological exploration within allocated and unallocated subsoil reserve fund. Aim. To determine the main directions of increasing hydrocarbon resources, with a special focus on the state of geological and geophysical knowledge about areas with high petroleum potential within unallocated subsoil reserve fund and about deep (the Jurassic and pre-Jurassic) oil and gas plays within allocated subsoil reserve fund. Methods. Retrospective analysis of the condition of hydrocarbon resources, licensing of subsoil reserve fund, amount and structure of exploratory drilling and seismic survey. Results and findings. The survey on case studies, analytics and reports of oil companies, Department of Subsurface Management & Natural Resources of Yugra and Research and Analytical Center for the Rational Use of the Subsoil named after V.I. Shpilman found that most of input seismic and drilling data is archival and requires a significant amount of reprocessing and reinterpretation. This paper determines logical and interrelated reasons for "underreplenishment" production volumes by increasing reserves of "new" oil. It is recommended to implement case studies in order to update archival geological and geophysical data within four dedicated oil-prospecting clusters in the territory of unallocated subsoil reserve fund. This paper gives recommendations on preparation of industrial category reserves in the Jurassic and pre-Jurassic plays within the territory of allocated subsoil reserve fund. Implementation of the recommendations will allow not only significantly increasing oil resources, but also promoting maintaining oil production at the planned level.

**Keywords:** allocated and unallocated subsoil reserve fund, exploratory drilling and seismic survey, "new" oil reserves, oilprospecting clusters, fuel and energy complex of Khanty-Mansi Autonomous Okrug – Yugra

**For citation:** Kuzmenkov S.G., Lobova G., Nanishvili O.A., Novikov M.V., Zakharova L.M., Zakharova V.A. Oil and gas exploration in Yugra (Khanty-Mansi autonomous okrug): issues and the main development directions. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 5, pp. 120–131. DOI: 10.18799/24131830/2025/5/5130

#### Введение

Тюменская область занимает ведущее положение в Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции, и большая доля по добыче углеводородов (УВ) приходится на земли Ханты-Мансийского автономного округа – Югры (далее ХМАО – Югра). 24 января 2025 г. в ХМАО – Югре произошло знаменательное событие – в регионе добыли 13-ти миллиардную тонну нефти. Особую роль и значительный вклад – почти 6 млрд т в достижении этого рубежа внесли 14 месторождений-ветеранов [1]. Только один Самотлор внес в эту копилку более 2,9 млрд т, Федоровское (более 670 млн т), Мамонтовское (621 млн т), Малобалыкское (200 млн т). Доля введенного в 1988 г. в промышленную разработку Приобского месторождения превысила 710 млн т. Заметим, что из 482 открытых в Югре месторождений к настоящему времени 290 находятся, можно сказать, на «зрелой стадии жизни». Не останавливаясь подробно на истории освоения недр Югры за прошедший 60-ти летний период, отметим, что эпоха «лёгкой» нефти в регионе закончилась. Об этом свидетельствует и планомерное, и прогнозируемое [1–3] снижение доли югорской нефти в общероссийской добыче.

Темпы снижения нельзя назвать обвалом, однако за последние 10 лет (2014–2024 гг.) в физиче-

ском выражении оно составило 45 млн т. Такое падение добычи объясняется многими причинами, среди которых можно выделить следующие. Основная часть разрабатываемых месторождений находится на завершающих стадиях эксплуатации, текущая выработанность объектов разработки в целом по региону [4] превысила 65 %, а обводнённость большинства разрабатываемых залежей [5] достигает 89 %. В добываемой продукции свыше 70 % [2] приходится на трудноизвлекаемые запасы нефти (ТрИЗ). И хотя, в связи с новыми геологотехнологическими вызовами по извлечению ТрИЗ, разрабатываются и предлагаются новые технологии как отечественными, так и зарубежными специалистами [6-10], этого на сегодняшний день явно недостаточно для покрытия «недокомпенсации» добычи.

Основной задачей для предприятий топливноэнергетического комплекса ХМАО – Югры на настоящее время является сохранение годовой добычи нефти на уровне 205–215 миллион тонн. Решение этой задачи во многом зависит от подготовки запасов «новой» нефти за счет увеличения объемов геологоразведочных работ в пределах поисковых зон распределённого (РФН) и нераспределённого фондов недр (НРФН).

По мнению исследователей [11], на месторождениях Югры перспективным является весь установленный этаж нефтегазоносности. Дополнительный потенциал связывается также с использованием 3Dсейсморазведки и комплексных исследований на старых месторождениях с открытием новых залежей и приростом запасов [9]. Количественная оценка нетрадиционных ресурсов, связанных с баженовскими отложениями [12], также показывает ещё один из возможных источников пополнения ресурсов в пределах её распространения на слабоизученных землях НРФН Югры. Имеется большой задел и в пределах РФН, где нижнеюрский и доюрский нефтегазоносные комплексы (НГК) не изучаются в связи с ограничениями поисковых лицензий по глубине [11]. Хотя по последним исследованиям группы ученых, «...палеозой Западной Сибири не сопоставим по запасам и ресурсам с юрскими и меловыми отложениями...» [13. С. 73] не стоит сбрасывать со счетов и этот источник «новой» нефти. Исходя из биогенной теории образования УВ, присутствие нижнеюрской нефтематеринской свиты практически на всей территории Югры [14], при условии ее высокого генерационного потенциала и наличии разуплотненных зон в доюрских отложениях, повышает перспективы обнаружения залежей УВ на этом стратиграфическом уровне [15].

Еще одно направление увеличения ресурсной базы основано на использовании информационных систем, где учеными предлагаются алгоритмы ретроспективного анализа геолого-геофизических материалов и данных по разработке залежей [16-18] с целью обнаружения остаточных запасов в многопластовых месторождениях. Даже рекомендации по сбору и использованию статистики относительно геологических параметров, пришедшие из глубины веков [19], могут быть полезны для определения перспектив и относительного риска, связанного с разведкой. Для прогнозирования остаточного потенциала территории исследования с целью наращивания запасов УВ учеными [20] рекомендуется использовать простой графический метод, позволяющий вносить поправки на геологическую характеристику, сложность бассейна и зрелость разведки. Вопрос поисков возможного увеличения ресурсов в пределах крупных добывающих нефтегазоносных провинций и восполнения запасов «новой» нефтью стоит достаточно остро у специалистов-нефтяников как в России, так и во всем Мире [3, 11, 18, 19].

Таким образом, на ближайшее время перед учеными Югры встала насущная проблема с поиском способов восполнения ресурсной базы нефти и поддержанием уровня годовой добычи на установленных плановых цифрах. Перед авторами настоящей публикации стоит актуальная задача – выполнить ретроспективный анализ состояния ресурсной базы углеводородного сырья, лицензирования фонда недр, объемов и структуры поисково-разведочного бурения (ПРБ) и сейсмических исследований с целью дать реальные рекомендации по возможному выходу из создавшегося положения.

#### Состояние ресурсной базы Югры

При подготовке стратегии социальноэкономического развития Ханты-Мансийского автономного округа - Югры до 2030 г. специалистами АУ ХМАО - Югры «Научно-аналитический рационального недропользования пентр ИМ. В.И. Шпильмана" был проведен аудит ресурсной базы углеводородного сырья (УВС) по всем нефтегазоносным комплексам территории автономного округа. Из рис. 1 следует, что начальные суммарные ресурсы (НСР) Югры составляют 32 % от общероссийских, а сумма ресурсов категорий С<sub>3</sub>+Д<sub>1</sub>+Д<sub>2</sub> превышает 22 % [21].

По состоянию на начало 2025 г. выявленность HCP нефти (доля начальных запасов A, B<sub>1</sub>, B<sub>2</sub>, C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub> в начальных суммарных ресурсах) по округу составляет 67 %, при этом 38 % (13 млрд т) извлечено из недр. На ресурсы в сумме категорий D<sub>0</sub>, D<sub>л</sub>, D<sub>1</sub> и D<sub>2</sub> (невыявленные ресурсы) приходится 33 % от HCP. Динамика структуры ресурсов и запасов по принадлежности к различным комплексам пород свидетельствует о значительном увеличении вклада отложений юрского и доюрского НГК в общий объем невыявленных ресурсов нефти округа и, соответственно, уменьшение роли меловых НГК. Всё вышеуказанное позволяет с определенной долей уверенности прогнозировать, что наращивание ресурсной базы нефти в пределах территорий НРФН, слабо изученных сейсморазведкой современных модификаций и практически не исследованных ПРБ, будет осуществляться за счет нижнесреднеюрских и доюрских комплексов пород.



Puc. 1. Структура начальных суммарных ресурсов Югры (по данным НАЦ РН им. В.И Шпильмана, 2023 г.)
Fig. 1. Structure of total initial resources of Yugra (according to Research and Analytical Center for the Rational Use of the Subsoil named after V.I. Shpilman, 2023)

Одной из причин потери интереса недропользователей к участию в конкурсах и аукционах на право пользования недрами является обеспеченность компаний запасами промышленных категорий на длительный период, что создает у недропользователей иллюзию полной безопасности добычи на перспективу [11].

Отметим, что особую, но не столь явную, роль в темпах падения добычи нефти можно отнести к снижению интереса предприятий ТЭК к лицензированию выставляемых объектов в пределах НРФН, что влечет за собой практически полное прекращение сейсмических исследований и поисковое бурение на этом фонде недр. Остановимся на этих аспектах более подробно.

#### Лицензирование фонда недр

В последние годы большая часть «новой» нефти открывается в пределах РФН за счет доразведки более глубоких горизонтов и переиспытания скважин старого фонда (пропущенные залежи), в которых ранее были получены непромышленные притоки нефти. Представляется, что это направление в современных условиях будет развиваться и дальше, поскольку компании еще не в полной мере освоили территории своей деятельности.

При этом расширение географии геологоразведочных работ (ГРР) и их смещение на слабоизученные, но не бесперспективные территории Югры, где сконцентрированы значительные объёмы невыявленных ресурсов углеводородного сырья и которые ожидают перевода их в запасы промышленных категорий, не происходит по ряду причин, среди которых следует выделить геологические, отраслевые (инфраструктурные), ценовые и законодательные.

Анализ состояния лицензирования территории автономного округа показал (рис. 2), что 47 % нефтеперспективных земель распределено между недропользователями, а остальная площадь, или 53 % территории, находится в НРФН, где ещё предстоит провести полный комплекс поисковоразведочных работ на нефть и газ.

По состоянию на 2025 г. общая площадь всех 577 лицензионных участков, в пределах которых предприятия ТЭК осуществляют добычу (эксплуатацию) нефти (лицензии НЭ) и газа (лицензии НГ), поисковые работы (лицензии НП), составляет 252 тыс. км<sup>2</sup>, а суммарная площадь долгосрочных лицензий типа НЭ и НГ – всего 197 тыс. км<sup>2</sup>, или 38,4 %, нефтегазоперспективных земель Югры.

На территории автономного округа производственную деятельность, связанную с поиском, разведкой и добычей УВС, осуществляют 8 вертикально-интегрированных компаний (ВИНК) и аффилированные с ними дочерние предприятия, а также 17 независимых недропользователей. В целом на ВИНК приходится 462 лицензии НЭ, НР (совмещенная: поиск-геологическое изучение-разведка-добыча), НП (поисковая с правом пролонгации в НР в случае открытия месторождения или залежи), а независимые недропользователи имеют 115 разрешений на право пользования недрами. При этом по типу лицензий они обладают 11 % – на добычу УВС, 17 % – разведочными и 47 % – поисковыми, что говорит об их достаточно активной лицензионной деятельности.

Согласно условиям лицензионных соглашений, на 318 лицензионных участков (ЛУ) с долгосрочными лицензиями НЭ и НР суммарной площадью в 152 тыс. км<sup>2</sup>, что составляет 30 % от площади нефтегазоперспективных земель округа, введено ограничение на право пользования недрами по глубине. В пределах контуров этих ЛУ в НРФН остаются практически не изученными глубокопогруженные отложения юрской и доюрской частей разреза, а на небольшом количестве участков (13 из 318) – нижние интервалы разреза меловых отложений (шельфовая или ачимовская части осложненного неокомского комплекса пород).



**Рис. 2.** Динамика лицензирования фонда недр в Югре за период с 1996 по 2023 гг. (по данным НАЦ РН им. В.И. Шпильмана, 2024 г.)

Fig. 2. Dynamics of licensing of the subsoil reserve fund of Yugra in 1996–2023 (according to Research and Analytical Center for the Rational Use of the Subsoil named after V.I. Shpilman, 2024)

На сегодня нефтедобывающие компании через переоформление лицензионных обязательств снимают эти ограничения, но не так активно, о чем свидетельствует динамика лицензирования фонда недр Югры.

В соответствии с Законом Российской Федерации от 21 февраля 1992 года № 2395-1 «О недрах» Правительством ХМАО - Югры ежегодно направляются в федеральное агентство по недропользованию предложения о включении участков недр в перечни как для их геологического изучения, так и для геологического изучения, разведки и добычи полезных ископаемых, осуществляемых по совмещенной лицензии. Из анализа лицензирования фонда недр следует, что период активности в Югре закончился в 2006 г., когда за невыполнение условий лицензионных соглашений было отозвано 15 лицензий НЭ и 52 лицензии НП. Попытки изменить негативную тенденцию продолжались вплоть до 2016 г., и лишь в последние годы компаниинедропользователи вновь стали проявлять интерес к лицензированию фонда недр.

Характерной особенностью проводимых аукционов является отсутствие конкуренции (не только в ХМАО, но и в целом по РФ) – все участки переданы единственным участникам аукционов с разницей между стартовой стоимостью и разовым платежом на один шаг аукциона. За последние 3 года Правительством автономного округа по такой схеме (несостоявшиеся аукционы) в пользование передано 16 участков, в 2023 г. – 5 участков недр, в 2024 г. – ни одного.

Сложившаяся с проведением конкурсов и аукционов ситуация требует не только изменения нормативно-правовой базы недропользования, но и пересмотра условий предоставления прав пользования недрами в целом по России. Недропользователь, степень обеспеченности запасами нефтедобычи которого превышает многие десятилетия, не желает там рисковать, а государство практически полностью отстранилось от этой проблемы.

## Анализ состояния геологоразведочных работ на нефть и газ

Открытия последних лет, сделанные в не очень ожидаемых, нестандартных геологических условиях (нижнеюрские – в Колтогорском прогибе и в пределах Амнинского вала, викуловские – в пределах Карабашского нефтегазоносного района на Оурьинском месторождении, залежи в триасе – на Рогожниковском месторождении, неокомские и тюменские залежи – в Юганской впадине) показали, что в Югре можно ожидать открытия месторождений нефти с учетом нетрадиционных условий их формирования.

Таким образом, мнение о том, что в Югре нельзя надеяться на открытие значительных по запасам залежей (!) и месторождений является несостоятельным. Например, только в период с 2000 по 2023 гг. в результате ГРР открыто 110 месторождений нефти и газа с извлекаемыми запасами от нескольких тыс. т (Северо-Западно-Пылинское месторождение в 2021 г., извлекаемые запасы категории  $C_1+C_2 - 0,4$  млн т) до нескольких десятков млн т (Оурьинское месторождение в 2013 г., извлекаемые запасы по категории  $C_1+C_2$  более 33 млн т). Отметим, что открытия состоялись в нетрадиционных (пока!) для Югры геолого-геофизических условиях

(клиноформы западного падения, борта мегапрогибов и впадины).

В истории добычи нефти в автономном округе можно выделить этап резкого её снижения. Так, всего за пять лет она упала на 111 млн т, с 275 млн т в 1991 г. до 164 млн т, достигнув «дна», в 1996 г. Это объясняется многими факторами, среди которых основным является отсутствие прозрачной системы лицензирования фонда недр. Введение ставок на воспроизводство минерально-сырьевой базы (ВМСБ), которые аккумулировались в бюджетах различных уровней и в соответствии со ст. 44 Закона «О недрах» могли использоваться только по целевому назначению, а именно на проведение ГРР с целью подготовки ресурсов (сейсмические исследования 2Д) и запасов нефти в пределах НРФН [3, 11], позволило частично исправить ситуацию, что подтверждает анализ динамики геологоразведочных работ на территории автономного округа (рис. 3).



**Рис. 3.** Динамика геологоразведочных работ на территории Югры (по материалам Депнедра Югры, 2024 г.): 1 – прирост запасов категории С<sub>1</sub>, В<sub>1</sub>, млн т; 2 – прирост запасов категории В, С<sub>1</sub> за счет разведки и переоценки, млн т; 3 – открытые месторождения, шт.; 4 – проходка, тыс. м



Так, за время действия ставок ВМСБ началось планомерное наращивание поисково-разведочного бурения, объемы которого в 2001 г. составили 810,3 тыс. м.

Всего за семь лет (1996–2002 гг. – время действия ставок ВМСБ) проходка ПРБ в Югре превысила 10,5 млн м, суммарный прирост запасов нефти категорий С<sub>1</sub>, В<sub>2</sub>, В<sub>1</sub> за счет разведки и переоценки составил 5,2 млрд т, из них 2,4 млрд т за счет разведки преимущественно единичными скважинами в результате открытия 111-и месторождений.

За этот период времени добыча нефти в округе составила почти 6,5 млрд т, при этом компенсация добычи составила 84 %, однако за счет ПРБ прирост «новой» нефти не превысил и 39 %.

Исходя из вышеуказанного, можно констатировать, что и сегодня в Югре ресурсная база нефтедобычи, как и в России в целом, находится на этапе «проедания» подготовленных ранее запасов, а геологоразведка находится в стадии «деградации». Это связано, в первую очередь, с недостаточными объёмами геологоразведочных работ (сейсморазведки и поисково-разведочного бурения) как в пределах РФН, так и на землях НРФН.

Ввиду малоразмерности по площади нефтепоисковых объектов и сложности их геологического строения в РФН поисковую съемку 2D недропользователи заменяют более детальной площадной съемкой 3D, а в пределах НРФН проводят сейсмические исследования 2D.

Объёмы сейсморазведочных работ 2D (рис. 4) до 2006 г. превышали 10 тыс. км, и начиная с 2018 г. не превышали 1,5 тыс. км. В период с 1996 по 2006 гг. работы проводились в границах поисковых блоков НРФН и, за редким исключением, в пределах долгосрочных лицензий.

Динамика объемов сейсморазведочных работ 3D достаточно стабильна и варьировала на протяжении длительного периода времени, вплоть до 2022 г., в диапазоне 3500–6000 км<sup>2</sup>. Отличительной особенностью данного вида исследований является их приуроченность к участкам с долгосрочными лицензиями, т. е. они не создают «поискового задела». Наметившаяся тенденция снижения сейсмических исследований 2D свидетельствует о том, что государство полностью устранилось от проблем подготовки новых поисковых объектов.

При этом полностью утрачен контроль за подготовкой ресурсов категории С<sub>3</sub>, что явно не соответствует основным положениям Постановления Правительства Российской Федерации от 02.08.97 г. № 986 «Перечень мероприятий по воспроизводству минерально-сырьевой базы, финансируемых из средств фонда воспроизводства минерально-сырьевой базы» и распоряжению Правительства Российской Федерации от 22 декабря 2018 г. N 2914-р. «Стратегии развития геологической отрасли РФ до 2035 года», в которой определено вложение компании в ГРР примерно 90 %, а государства – 10 % от общего объема затрат.

В ноябре 2024 г. заместитель губернатора Югры А.Г. Забозлаев в рамках проведения пленарного заседания 27 НПК «Пути реализации нефтегазового потенциала Ханты-Мансийского автономного округа – Югры», отметив потерю интереса предприятий ТЭК к лицензированию, предложил сконцентрироваться на подготовке «новой» нефти за счет расширения географии геологоразведочных работ в пределах НРФН.







 Puc. 5. Схема расположения нефтепоисковых кластеров (по данным Депнедра Югры, 2025 г.)
 Fig. 5. Layout of oil-prospecting clusters (according to Department of Subsurface Management & Natural Resources of Khanty-Mansi Autonomous Okrug – Yugra, 2025)

В качестве первоочередных объектов лицензирования фонда недр были предложены четыре нефтепоисковых кластера (рис. 5), извлекаемые ресурсы нефти в пределах которых по категориям  $D_0+D_n+D_1+D_2$  составляют более 2,6 млрд т.

По степени перспективности наибольший интерес представляет Березовско- Белоярский кластер, предварительный объем нефтяного потенциала которого составляет более 1,2 млрд т извлекаемых ресурсов нефти, ресурсная база Кондинского и Колтогорского (самого маленького по площади) кластеров колеблется от 550 до 360 млн т соответственно, а в пределах Восточно-Вартовского прогнозируется около 500 млн т.

Указанные нефтепоисковые кластеры, согласно принятому в НАЦ РН им. В.И. Шпильмана районированию плотностей невыявленных ресурсов нефти, расположены следующим образом:

- Березовско-Белоярский на среднеперспективных (20–60 тыс. т/км<sup>2</sup>) землях;
- Кондинский преимущественно на среднеперспективных (20–60 тыс. т/км<sup>2</sup>) землях и частично на высокоперспективных (60–150 тыс. т/км<sup>2</sup>) территориях;
- Колтогорский на среднеперспективных (20–60 тыс. т/км<sup>2</sup>) и частично на высокоперспективных (60–150 тыс. т/км<sup>2</sup>) землях;
- Восточно-Вартовский преимущественно на малоперспективных территориях (10–20 тыс. т/км<sup>2</sup>) и частично (20–60 тыс. т/км<sup>2</sup>) на среднеперспективных землях.

Отметим, что оценка плотностей невыявленных ресурсов нефти по первой и последней из перечисленных территорий проведена по «историческим» данным прошлого века с использованием сейсмических исследований 2D преимущественно 12-ти кратного перекрытия и результатов стандартных геофизических исследований скважин при поисковом бурении. Все это позволяет отнестись к проведенной оценке с определенной долей недоверия.

Основные открытия в пределах высокоперспективных земель следует ожидать в меловом и верхнеюрском НГК с традиционными колллекторами и их кондиционными фильтрационно-емкостными свойствами. На среднеперспективных землях основные открытия можно связывать с залежами в глубоких горизонтах средней-нижней юры и доюрского комплекса пород. Что касается Восточно-Вартовского кластера, то оценку перспектив его нефтеносности следует связывать, в первую очередь, с нижнеюрским и доюрским НГК. Для этого необходимо привлекать современные методы исследований, включая комплексирование данных сейсморазведки, грави-магниторазведки, геотермии и результатов бурения поисковых и разведочных скважин [15, 22-25].

Значительный вклад в прирост запасов «новой» нефти могут внести разрабатываемые ЛУ с лицензиями НЭ и НП, имеющие ограничение по глубине. На этих участках, а их, как отмечалось выше, 318 из 577, высока вероятность обнаружения залежей преимущественно в среднеюрском НГК. Перспективы доюрских и нижнеюрских отложений во всех кластерах требуют дополнительного изучения.

#### Заключение

Рассмотрев состояние лицензирования фонда недр и итоги проведения геологоразведочных работ в пределах нефтеперспективных земель Югры, можно сделать следующие выводы.

- Для того, чтобы Югра ещё долгие годы оставалась основным регионом нефтедобычи, для чего существуют реальные предпосылки в первую очередь, и, с учетом состояния ресурсной базы углеводородного сырья в целом, необходимо расширение географии поисково-разведочных работ в пределах НРФН.
- Наращивание запасов «новой» нефти следует ожидать в глубокозалегающих (средне-, нижнеюрских и доюрских) комплексах пород, доразведка которых в пределах РФН позволит стабилизировать добычу нефти на достигнутых в последние годы уровнях.
- Сложившаяся с лицензированием фонда недр Югры ситуация является провальной в силу низкого интереса компаний-недропользователей к формируемым программам лицензирования территории НРФН. Большинство открытых залежей расположено на участках РФН, а в нераспределенном фонде и на участках поисковых лицензий геологоразведочные работы практически не проводятся.
- 4. Для стимулирования проведения геологоразведочных работ на нефть и подготовки ресурсов нефти в НРФН необходимо проведение масштабных тематических работ с целью ревизии и переобработки (!) на современном материальнотехническом уровне всех имеющихся геологогеофизических материалов, что, в свою очередь, позволит уточнить состояние ресурсной базы УВС по всем нефтегазоносным комплексам в пределах НРФН.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Состояние и перспективы развития ресурсной базы Югры / С.Г. Кузьменков, О.А. Нанишвили, М.В. Новиков, Л.М. Захарова, В.А. Захарова // Успехи современного естествознания. – 2024. – № 12. – С. 133–139.
- 2. Методы увеличения нефтеотдачи на месторождениях Югры / С.Г. Кузьменков, Р.Ш. Аюпов, М.В. Новиков, В.И. Исаев, Г.А. Лобова, П.А. Стулов, В.С. Бутин, Е.О. Астапенко // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2020. Т. 331. № 4. С. 96–106.
- Ресурсная база углеводородов территории Ханты-Мансийского автономного округа Югры и пути ее развития / Е.В. Олейник, С.Г. Кузьменков, М.В. Новиков, Е.Е. Оксенойд, Л.М. Захарова, Е.В. Икон, В.Г. Поповская // Георесурсы. – 2023. – Т. 25. – № 1. – С. 48–55.
- Сопоставление выработки запасов нефти основными недропользователями ХМАО Югры / А.В. Оренбуркин, Н.Ю. Галкин, Н.Д. Марьина, Н.В. Козельская // Пути реализации нефтегазового потенциала ХМАО. Двадцать вторая научно-практическая конференция. Т. 2. – Ханты-Мансийск: ИздатНаукасервис, 2019. – С. 44–52.
- Оценка добычного потенциала нефтяных месторождений ХМАО Югры в современных условиях / И.П. Толстолыткин, Н.В. Мухарлямова, Т.Н. Печерин, М.В. Стрельченко // Пути реализации нефтегазового потенциала ХМАО. Двадцать вторая научно-практическая конференция. Т. 1. – Ханты-Мансийск: ИздатНаукасервис, 2019. – С. 15–23.
- 6. Геолого-технологические вызовы и опыт разработки трудноизвлекаемых запасов / А.В. Язьков, С.В. Колбиков, Н.А. Шадчнев, О.В. Любимова, П.Г. Ибадуллаев // Георесурсы. 2024. Т. 26. № 3. С. 7–12. DOI: https://doi.org/10.18599/grs.2024.3.1
- Sternbach Ch.A. Super basin thinking: methods to explore and revitalize the world's greatest petroleum basins // AAPG Bulletin. – 2020. – Vol. 104. – № 12. – P. 2463–2506. DOI: https://doi.org/10.1306/09152020073
- The whole petroleum system with ordered coexistence of conventional and unconventional hydrocarbons: case from the Junggar Basin, China / Yong Tang, Jian Cao, Wenjun He, Yin Liu, Zhijun Qin, Liliang Huang // AAPG Bulletin. – 2024 – Vol. 108. – № 7. – P. 1261–1290. DOI: https://doi.org/10.1306/06192322086
- Khafizov S., Syngaevsky P., Dolson J.C. The West Siberian Super Basin: the largest and most prolific hydrocarbon basin in the world // AAPG Bulletin. – 2022. – Vol. 106. – № 3. – P. 517–572. DOI: https://doi.org/10.1306/11192121086
- 10. Долгополов Ф.Г., Мелихов В.Н., Кувшинова М.Ф. Проблема освоения ресурсов трудноизвлекаемого связанного газа в осадочных бассейнах Центральной Азии // Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2024. Т. 19. № 1. URL: https://www.ngtp.ru/rub/2024/6\_2024.html (дата обращения 19.02.2025).
- 11. Олейник Е.В., Икон Е.В., Попова Н.Л. Результаты и перспективные направления поисково-разведочных работ на территории Ханты-Мансийского автономного округа Югры // Геология нефти и газа. 2023. № 2. С. 17–36.
- Результаты количественной оценки нетрадиционных ресурсов нефти Российской Федерации / П.Н. Мельников, А.И. Варламов, Н.К. Фортунатова, В.Н. Пороскун, А.В. Соловьев, М.Б. Скворцов, М.Н. Кравченко, А.С. Канев, А.Г. Сотникова // Геология и геофизика. – 2024. – Т. 65. – № 1. – С. 8–25.
- Геологическое строение и перспективы нефтегазоносности палеозойских отложений юго-восточных районов Западной Сибири / В.А. Конторович, А.Э. Конторович, Д.В., Аюнова, С.М. Ибрагимова, Л.М. Бурштейн, А.Ю. Калинин, Л.М. Калинина, К.И. Канакова, Е.А., Костырева, М.В. Соловьев, Ю.Ф. Филиппов // Геология и геофизика. – 2024. – Т. 65. – № 1. – С. 72–100.
- 14. Ulmishek G.F. Petroleum geology and resources of the West Siberian Basin, Russia. Reston, Virginia, USA: US Department of the Interior, US Geological Survey, 2003. 53 p.
- 15. Стратегия и основы технологии поисков углеводородов в доюрском основании Западной Сибири / В.И. Исаев, Г.А. Лобова, Ю.В. Коржов, М.Я. Кузина, Л.К. Кудряшова, О.Г. Сунгурова. Томск: Изд-во ТПУ, 2014. 113 с.

- 16. Белозёров В.Б., Силкин Г.Е. Критерии переоценки перспектив нефтегазоносности коллекторных зон фундамента юговостока Западной Сибири // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333. – № 2. – С. 7–16.
- 17. Алгоритм ретроспективного анализа по выявлению и локализации остаточных запасов разрабатываемого многопластового нефтяного месторождения / Р.Н. Бурханов, А.А. Лутфуллин, А.В. Максютин, И.Р. Раупов, И.В. Валиуллин, И.М. Фаррахов, М.В. Швыденко // Георесурсы. 2022. Т. 24. № 3. С. 125–138. DOI: https://doi.org/10.18599/grs.2022.3.11
- 18. Klemme H.D. Giant oil fields related to their geologic setting: a possible guide to exploration // Bulletin of Canadian Petroleum Geology. 1975. Vol. 23. № 1. Р. 30–66. URL: https://pubs.geoscienceworld.org/cspg/bcpg/article/23/1/30/57098 (дата обращения 19.02.2025).
- 19. Deming D.M. King Hubbert and the rise and fall of peak oil theory // AAPG Bulletin. 2023. Vol. 107. № 6. P. 851–861. DOI: 10.1306/03202322131
- 20. Direct projection of remaining potential from historical discoveries / K.C. Hood, I.M. Longley, P. Ventris, J. Jarvis // AAPG Bulletin. 2023. Vol. 107. № 10. P. 1669–1685. DOI: https://doi.org/10.1306/01122322066
- 21. Эффективность применения методов повышения нефтеотдачи пластов и интенсификации добычи нефти на месторождениях Ханты-Мансийского автономного округа Югры / С.Г. Кузьменков, М.И. Королев, М.В. Новиков, А.Н. Паляницина, О.А. Нанишвили, В.И. Исаев // Георесурсы. 2023. Т. 25. № 3. С. 129–139. DOI: https://doi.org/10.18599/grs.2023.3.16
- 22. Brekhuntsov A.M., Monastyrev B.V., Nesterov I.I. Jr. Distribution patterns of oil and gas accumulations in West Siberia // Russian Geology and Geophysics. 2011. Vol. 52. № 8. P. 781–791.
- 23. Hard-to-recover Reserves of Yugra Oil (West Siberia) / V.I. Isaev, S.G. Kuzmenkov, R.Sh. Ayupov, Yu.A. Kuzmin, G.A. Lobova, P.A. Stulov // Geofizicheskii zhurnal. 2019. Vol. 41. № 1. P. 33–43.
- 24. Botor D. Burial and thermal history modeling of the Paleozoic-Mesozoic basement in the Northern Margin of the Western Outer Carpathians (Case Study from Pilzno-40 Well, Southern Poland) // Minerals. 2021. Vol. 11. № 7. P. 1–23. DOI: https://doi.org/10.3390/min11070733
- 25. The thermal history in sedimentary basins: A case study of the central Tarim Basin, Western China / D. Li, J. Chang, N. Qiu, J. Wang, M. Zhang, X. Wu, J. Han, H. Li, A. Ma // Journal of Asian Earth Sciences. 2022. Vol. 229. P. 1–17. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2022.105149

#### Информация об авторах

**Станислав Григорьевич Кузьменков,** доктор геолого-минералогических наук, профессор Высшей нефтяной школы Югорского государственного университета, Россия, 628012, г. Ханты-Мансийск, ул. Чехова 16; ksg.1947@yandex.ru

**Галина А. Лобова,** доктор геолого-минералогических наук, доцент, профессор отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30; lobovaga@tpu.ru; https://orcid.org/0000-0002-5744-2171

**Ольга Александровна Нанишвили,** старший преподаватель Высшей нефтяной школы Югорского государственного университета, Россия, 628012, г. Ханты-Мансийск, ул. Чехова 16; o\_nanishvili@ugrasu.ru

**Максим Васильевич Новиков,** заместитель директора, Департамент недропользования и природных ресурсов Ханты-Мансийского автономного округа – Югры, Россия, 628007, г. Ханты-Мансийск, ул. Студенческая, 2; NovikovMV@admhmao.ru

**Лариса Михайловна Захарова,** заместитель директора автономного учреждения «Научноаналитический центр рационального недропользования им. В.И. Шпильмана», Россия, 625026, г. Тюмень, ул. Малыгина, 75; zaharova@crru.ru

**Валерия Александровна Захарова,** научный сотрудник отделения геологического моделирования и подсчета запасов автономного учреждения «Научно-аналитический центр рационального недропользования им. В.И. Шпильмана», Россия, 625026, г. Тюмень, ул. Малыгина, 75; relka13@yandex.ru

Поступила в редакцию: 22.03.2025 Поступление после рецензирования: 28.03.2025 Принята к публикации: 10.04.2025

#### REFERENCES

- 1. Kuzmenkov S.G., Nanishvili O.A., Novikov M.V., Zakharova L.M., Zakharova V.A. Status and prospects for the development of Yugra's resource base. *Advances in current natural sciences*, 2024, no. 12, pp. 133–139. (In Russ.)
- Kuzmenkov S.G., Ayupov R.Sh., Novikov M.V., Isaev V.I., Lobova G.A., Stulov P.A., Butin V.S., Astapenko E.O. Enhanced oil recovery methods at fields of Yugra. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 4, pp. 96–106. (In Russ.)
- 3. Oleinik E.V., Kuzmenkov S.G., Novikov M.V., Oksenoyd E.E., Zakharova L.M., Ikon E.V., Popovskaya V.G. The resource base of hydrocarbons in the territory of Khanty-Mansi Autonomous Okrug Yugra and ways of its development. *Georesources*, 2023, vol. 25, no. 1, pp. 60–66. (In Russ.)

- Orenburkin A.V., Galkin N.Yu., Marina N.D., Kozelskaya N.V. Comparison of oil reserves production by major subsoil users of Khanty-Mansi Autonomous Okrug – Yugra. Ways of oil-and-gas potential implementation of Khanty-Mansi Autonomous Okrug. 22<sup>nd</sup> Research-to-Practice Conference. Khanty-Mansiysk, IzdatNaukaServis Publ., 2019. Vol. 2, pp. 44–52. (In Russ.)
- Tolstolytkin I.P., Muharlyamova N.V., Pecherin T.N., Strelchenko M.V. Estimation of production potential of oil fields of Khanty-Mansi Autonomous Okrug – Yugra in modern conditions. Ways of oil-and-gas potential implementation of Khanty-Mansi Autonomous Okrug. 22<sup>nd</sup> Research-to-Practice Conference. Khanty-Mansiysk, IzdatNaukaServis Publ., 2019. Vol. 1, pp. 15–23. (In Russ.)
- Yazkov A.V., Kolbikov S.V., Shadchnev N.A., Luybimova O.V., Ibadullaev P.G. Geological and Technological Challenges and Experience in Developing Hard-to-Recover Reserves. *Georesources*, 2024, vol. 26, no. 3, pp. 7–12. (In Russ.) DOI: https://doi.org/10.18599/grs.2024.3.1
- 7. Sternbach C.A. Super basin thinking: Methods to explore and revitalize the world's greatest petroleum basins. *AAPG Bulletin*, 2020, vol. 104, no. 12, pp. 2463–2506. DOI: https://doi.org/10.1306/09152020073
- 8. Tang Y., Cao J., He W., Liu Y., Qin Z., Huang L. The whole petroleum system with ordered coexistence of conventional and unconventional hydrocarbons: case from the Junggar Basin, China. *AAPG Bulletin*, 2024, vol. 108, no. 7, pp. 1261–1290. DOI: https://doi.org/10.1306/06192322086
- 9. Khafizov S., Syngaevsky P., Dolson J.C. The West Siberian Super Basin: the largest and most prolific hydrocarbon basin in the world. *AAPG Bulletin*, 2022, vol. 106, no. 3, pp. 517–572. DOI: https://doi.org/10.1306/11192121086
- Dolgopolov F.G., Melikhov V.N., Kuvshinova M.F. The problem of developing of hard to recover associated gas resources in sedimentary basins Central Asia. *Neftegazovaya Geologiya. Teoriya i Praktika*, 2024, vol. 19, no. 1, pp. 1–35. (In Russ.) Available at: https://www.ngtp.ru/rub/2024/6\_2024.html (accessed 19 February 2025).
- 11. Oleynik E.V., Ikon E.V., Popova N.L. Khanty-Mansi Autonomous Okrug Yugra: results and promising areas for exploration. *Geologiya nefti i gaza*, 2023, no. 2, pp. 17–36. (In Russ.)
- 12. Melnikov P.N., Varlamov A.I., Fortunatova N.K., Poroskun V.I., Solovev A.V., Skvortsov M.B., Kravchenko M.N., Kanev A.S., Sotnikova A.G. Results of quantitative estimation of unconventional oil resources of the Russian Federation. *Russian Geology and Geophysics*, 2024, vol. 65, no. 1, pp. 5–19. (In Russ.)
- Kontorovich V.A., Kontorovich A.E., Ayunova D.V., Ibragimova S.M., Burshtein L.M., Kalinin A.Yu., Kalinina L.M., Kanakova K.I., Kostyreva E.A., Solovyev M.V., Filippov Yu.F. Geological structure and prospects of hydrocarbon potential of paleozoic deposits in southeastern regions of West Siberia. *Russian Geology and Geophysics*, 2024, vol. 65, no. 1, pp. 60–84. (In Russ.)
- 14. Ulmishek G.F. Petroleum geology and resources of the West Siberian Basin, Russia. Reston, Virginia, USA, US Department of the Interior, US Geological Survey, 2003. 49 p.
- 15. Isaev V.I., Lobova G.A., Korzhov Yu.V., Kuzina M.Ya., Kudryashova L.K., Sungurova O.G. *Strategy and technology basis for hydrocarbon prospecting in the pre-Jurassic basement of Western Siberia*. Tomsk, TPU Publ., 2014. 112 p. (In Russ.)
- 16. Belozerov V.B., Silkin G.E. Criteria for reassessment of oil and gas potential of reservoir zones in southeastern Western Siberia basement. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, no. 2, pp. 7–16. (In Russ.)
- 17. Burkhanov R.N., Lutfullin A.A., Maksyutin A.V., Raupov I.R., Valiullin I.V., Farrakhov I.M., Shvydenko M.V. Retrospective analysis algorithm for identifying and localizing residual reserves of the developed multilayer oil field. *Georesources*, 2022, vol. 24, no. 3, pp. 125–138. (In Russ.) DOI: https://doi.org/10.18599/grs.2022.3.11
- Klemme H.D. Giant oil fields related to their geologic setting: a possible guide to exploration. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, 1975, vol. 23, no. 1, pp. 30–66. Available at: https://pubs.geoscienceworld.org/cspg/bcpg/article/23/1/30/57098 (accessed 19 February 2025).
- 19. Deming D.M. King Hubbert and the rise and fall of peak oil theory. AAPG Bulletin, 2023, vol. 107, no. 6, pp. 851–861. DOI: 10.1306/03202322131
- 20. Hood K.C., Longley I.M. Ventris P., Jarvis J. Direct projection of remaining potential from historical discoveries. *AAPG Bulletin*, 2023, vol. 107, no. 10, pp. 1669–1685. DOI: https://doi.org/10.1306/01122322066
- Kuzmenkov S.G., Korolev M.I., Novikov M.V., Palyanitsina A.N., Nanishvili O.A., Isaev V.I. Efficiency of enhanced oil recovery's and oil production stimulation's methods at the oil fields of Khanty-Mansi Autonomous Okrug – Yugra. *Georesources*, 2023, vol. 25, no. 3, pp. 129–139. (In Russ.) DOI: https://doi.org/10.18599/grs.2023.3.16
- 22. Brekhuntsov A.M., Monastyrev B.V., Nesterov I.I. Distribution patterns of oil and gas accumulations in West Siberia. *Russian Geology and Geophysics*, 2011, vol. 52, no. 8, pp. 781–791.
- 23. Isaev V.I., Kuzmenkov S.G., Ayupov R.Sh., Kuzmin Yu.A., Lobova G.A., Stulov P.A. Hard-to-recover reserves of Yugra oil (West Siberia). *Geofizicheskii zhurnal*, 2019, vol. 41, no. 1, pp. 33–43.
- Botor D. Burial and thermal history modeling of the Paleozoic-Mesozoic basement in the Northern Margin of the Western Outer Carpathians (Case Study from Pilzno-40 Well, Southern Poland). *Minerals*, 2021, vol. 11, no. 7, pp. 1–23. DOI: https://doi.org/10.3390/min11070733
- 25. Li D., Chang J., Qiu N., Wang J., Zhang M., Wu X., Han J., Li H., Ma A. The thermal history in sedimentary basins: A case study of the central Tarim Basin, Western China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2022, vol. 229, pp. 1–17. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2022.105149

#### Information about the authors

**Stanislav G. Kuzmenkov**, Dr. Sc., Professor, Yugra State University, 16, Chekhov street, Khanty-Mansiysk, 628012, Russian Federation. ksg.1947@yandex.ru

**Galina A. Lobova**, Dr. Sc., Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. lobovaga@tpu.ru; https://orcid.org/0000-0002-5744-2171

**Olga A. Nanishvili**, Senior Lecturer, Yugra State University, 16, Chekhov street, Khanty-Mansiysk, 628012, Russian Federation. o\_nanishvili@ugrasu.ru

**Maksim V. Novikov**, Deputy Director, Department of Subsurface Management & Natural Resources of Khanty-Mansi Autonomous Okrug – Yugra, 2, Studencheskaya street, Khanty-Mansiysk, 628007, Russian Federation. NovikovMV@admhmao.ru

**Larisa M. Zakharova**, Deputy Director, Research and Analytical Center for the Rational Use of the Subsoil named after V.I. Shpilman, 75, Malygin street, Tyumen, 625026, Russian Federation. zaharova@crru.ru

**Valeria A. Zakharova**, Research Officer, Research and Analytical Center for the Rational Use of the Subsoil named after V I. Shpilman, 75, Malygin street, Tyumen, 625026, Russian Federation. relka13@yandex.ru

Received: 22.03.2025 Revised 28.03.2025 Accepted: 10.04.2025 УДК 662.276:550.8.052 DOI: 10.18799/24131830/2025/5/5131 Шифр специальности ВАК: 1.6.11 Научная статья

## Особенности эксплуатации массивной залежи нефти пласта М1 палеозойского фундамента Арчинской площади горизонтальным фондом скважин

## В.Б. Белозеров<sup>⊠</sup>, Д.М. Овчаренко, Л.А. Краснощёкова, Ю.А. Ужегова

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск

<sup>⊠</sup>BelozerovVB@hw.tpu.ru

Аннотация. Актуальность. К одному из перспективных и малоизученных объектов поисковых работ на нефть и газ в Западной Сибири относят отложения палеозойского фундамента. Сложность строения, как самого объекта, так и выявленных в нём залежей углеводородов обусловлена многообразием тектоно-седиментационных процессов, проявившихся на рассматриваемой территории в палеозое. Реконструкции этих процессов базируются на анализе вещественного состава, возрастных определениях пород фундамента, полученных в процессе бурения глубоких скважин, и данных сейсморазведки. Слоисто-складчатое строение продуктивного резервуара кровельной части палеозойских отложений (пласт М1) требует определённого методического подхода в разработке сосредоточенных в них залежей углеводородов. Исходя из особенностей строения рассматриваемого комплекса, разработку залежи нефти пласта М1 Арчинской площади наиболее рационально осуществлять горизонтальным фондом эксплуатационных скважин, пробуренных в его кровельной части. Цель. Провести систематизацию профилей притока нефти и обводнённости продукции эксплуатационного фонда горизонтальных скважин пласта М1 и сопоставить интенсивности поглощения бурового раствора с типом коллекторов пород фундамента Арчинской площади. Проанализировать полученные данные профилей притока в соответствии с прогнозируемой неоднородностью фильтрационноемкостных свойств интервалов слоисто-складчатой модели продуктивного резервуара и выполнить их систематизацию по динамике поведения рассматриваемых параметров во времени. Сформулировать причины формирования выделяемых типов притока в соответствии с прогнозной фильтрационно-емкостной неоднородностью интервалов, вскрываемых горизонтальной скважиной. Представить предложения по повышению эффективности эксплуатации фонда горизонтальных скважин. Объект. Кровельная часть пород палеозойского фундамента (пласт М1) Арчинской площади. Методика. Основана на интерпретации полученных профилей притока нефти и обводнённости продукции по эксплуатационному фонду горизонтальных скважин с прогнозной фильтрационно-емкостной неоднородностью слоисто-складчатой модели пласта М1, проявляющейся в интервальных поглощениях промывочной жидкости при бурении скважины. Результаты. В процессе проведённых исследований по особенностям изменения динамики притока нефти и обводнённости во времени в горизонтальных скважинах эксплуатационного фонда пласта M1 выделено пять типов притока. Для каждого выделенного типа представлена легенда фильтрационноемкостной неоднородности интервалов притока, вскрываемых горизонтальной скважиной, и предложены мероприятия по продлению периода её эксплуатации.

Ключевые слова: горизонтальная скважина, профиль притока, слоисто-складчатая модель, кавернозно-трещинный коллектор, дебит нефти

Для цитирования: Особенности эксплуатации массивной залежи нефти пласта М1 палеозойского фундамента Арчинской площади горизонтальным фондом скважин / В.Б. Белозеров, Д.М. Овчаренко, Л.А. Краснощёкова, Ю.А. Ужегова // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 5. – С. 132–143. DOI: 10.18799/24131830/2025/5/5131

UDC 662.276:550.8.052 DOI: 10.18799/24131830/2025/5/5131 Scientific paper

## Features of exploiting massive oil reservoir of the M1 formation of the Paleozoic basement at the Archinskaya area by the horizontal wells

### V.B. Belozerov<sup>⊠</sup>, D.M. Ovcharenko, L.A. Krasnoshchekova, Yu.A. Uzhegova

#### National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

#### <sup>™</sup>belozerovvb@hw.tpu.ru

Abstract. Relevance. Deposits of the Paleozoic basement are considered to be one of the promising and poorly studied objects of oil and gas exploration in Western Siberia. The complexity of the structure of the object and the hydrocarbon deposits identified in it is due to the variety of tectonical and sedimentary processes that manifested themselves in the territory under consideration in the Paleozoic era. Reconstructions of these processes are based on the analysis of the material composition, age determinations of the basement rocks obtained during drilling of deep wells and seismic data. The layered-folded structure of the productive reservoir of the roof part of the foundation (formation M1) requires a certain methodological approach in the development of hydrocarbon deposits concentrated in them. Based on the structural features, it is most rational to develop the M1 Archinskaya area oil reservoir using a horizontal fund of production wells drilled in its roofing part. Aim. To systematize the profiles of oil inflow and waterlogging of the production of the operating fund of horizontal wells of the M1 formation. To compare the intensity of drilling mud absorption with the type of collectors of the basement rocks of Archinskaya area. To analyze the obtained data of the inflow profiles in accordance with the heterogeneity of the filtration-capacitance properties of the intervals of the layered-folded model of the productive reservoir and to systematize them according to the dynamics of the behavior of the parameters under consideration over time. To formulate the reasons for the formation of the selected types of inflow in accordance with the predicted filtration and reservoir heterogeneity of the intervals opened by a horizontal well. To submit proposals for the efficient operation of the horizontal well fund. **Object.** Roofing part of the Paleozoic basement rocks (stratum M1) of Archinskaya area. **Method.** Based on the interpretation of the obtained profiles of oil inflow and water flow from a horizontal well with a predicted heterogeneity of the filtration properties of the layered model of the M1 formation, manifested in the interval absorption of the washing liquid during drilling. Results. For each selected type, a legend of the filtration-capacity heterogeneity of the inflow intervals by a horizontal well was compiled and measures were proposed to extend the period of its operation.

Keywords: horizontal well, inflow profile, layered-folded model, cavernous-pore-fractured reservoir, oil inflow

**For citation:** Belozerov V.B., Ovcharenko D.M., Krasnoshchekova L.A., Uzhegova Yu.A. Features of exploiting massive oil reservoir of the M1 formation of the Paleozoic basement at the Archinskaya area by the horizontal wells. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Asset Engineering*, 2025, vol. 336, no. 5, pp. 132–143. DOI: 10.18799/24131830/2025/5/5131

#### Введение

Особенности формирования отложений палеозоя Западной Сибири рассмотрены в работах [1–7].

Перспективы нефтегазоносности палеозойского фундамента обоснованы как с позиции общих геологических предпосылок его строения [8–11], так и с учётом открытых залежей углеводородов [12–14]. Однако разработка выявленных залежей не учитывает тектоническую структуру его формирования, что отражается на эффективности эксплуатации месторождений.

Возможность построения более объективных слоисто-складчатых моделей продуктивных резервуаров в отложениях палеозойского фундамента на основе новых методик обработки сейсмической информации [8] способствует формированию наиболее рациональных систем разработки сосредоточенных в них залежей углеводородов. В качестве примера можно рассмотреть результаты эксплуатации залежи нефти пласта М1 палеозойского фундамента Арчинской площади горизонтальным фондом добывающих скважин.

#### Методика исследования

Учитывая, что изучение любой получаемой фактической информации предполагает понимание особенностей строения объекта, формирующего анализируемые данные, при систематизации результатов эксплуатации горизонтальных скважин Арчинской площади необходимо принимать во внимание особенности складчатой структуры фундамента, литологическую неоднородность рассматриваемой осадочной толщи и пространственное положение горизонтального ствола в прогнозной слоисто-складчатой модели продуктивного резервуара.

Рассматривая построение структурной модели фундамента на основе интерпретации данных сейсморазведки, необходимо отметить сложность идентификации одновозрастных отражающих горизонтов в складчато-блоковом строении палеозойского комплекса [9–11].

Морфологию его структурной поверхности более рационально формировать по фрагментам хорошо выраженных отражающих границ I и II (рис. 1, a) в качестве единого элемента, не осложнённого тектоническими нарушениями, с учётом их структурной унаследованности в разрезе в пределах отдельных стратиграфических блоков (рис. 1,  $\delta$ ).

Осадочная толща палеозойского комплекса в рамках построенной структурной модели по условному отражающему горизонту I–II будет отображаться на эрозионно-тектонической поверхности фундамента последовательностью распределения прослоев пород (слой 1–5), вскрытых в вертикальных разрезах скважин, и соответствующих проекций на неё глубинных отметок построенной условной структурной основы с учетом литологической неоднородности (рис. 1,  $\delta$ ).

Связь построенной структурной поверхности с разными литотипами пород пласта М1 позволяет прогнозировать морфологию пространственного развития литологической однородности в кровле палеозойского фундамента по данным вертикальных и горизонтальных скважин.

В условиях слоисто-складчатой модели палеозойских образований и сложной геологической неоднородности коллектора разработка залежи углеводородов массивного типа пласта М1 в пределах нефтяной зоны осуществлялась проводкой горизонтальных эксплуатационных скважин в кровельной части фундамента, ориентированных по падению структурного плана палеозойского комплекса (рис. 1,  $\delta$ ; 3). В районах газонефтяной зоны горизонтальными скважинами вскрывалась нефтяная часть продуктивного резервуара (рис. 3). Протяжённость горизонтального ствола эксплуатационной скважины ограничивалась влиянием зоны катастрофического поглощения промывочной жидкости, препятствующей дальнейшему бурению.

Значительные постседиментационные изменения отложений кровельной части пласта М1 Арчинской площади с учётом отсутствия кернового материала в скважинах с горизонтальным профилем проходки исключают возможность количественной интерпретации фильтрационноемкостных особенностей разреза по данным геофизических исследований в скважине (ГИС).

В то же время достаточно хорошо латеральная неоднородность коллектора в горизонтальных скважинах на качественном уровне отражается интенсивностью поглощения промывочной жидкости и скоростью проходки, что обусловлено углеводородным насыщением и различной латеральной проницаемостью пласта М1 [12]. На рис. 2, а приведён пример поглощения промывочной жидкости при бурении 165-метрового горизонтального ствола скважины Н6, где выделяется 8 интервалов неоднородности коллекторных свойств. Низкие скорости поглощения отмечаются для пятого и шестого интервалов проходки, средние - для второго, третьего, четвертого и восьмого интервалов, высокие – для первого и катастрофические – для седьмого интервала. С интенсивностью поглощения хорошо коррелируется и скорость проходки. Учитывая, что величина поглощения и скорость проходки в карбонатно-терригенном коллекторе зависит от фильтрационно-емкостных особенностей переслаивающихся литологических разностей, можно сформировать качественную характеристику анализируемого карбонатного коллектора.

В соответствии с литологическим строением отложений палеозоя Арчинской площади [13–16] и особенностями разработки терригеннокарбонатных отложений [17, 18] можно выделить четыре типа коллекторов, характеризующих определённую связь между емкостными и фильтрационными характеристиками продуктивного пласта.

- трещинно-каверновый трещины обеспечивают основную проницаемость коллектора, а матрица – основную пористость;
- порово-трещинный трещины дополняют проницаемость коллектора;
- трещинный трещины обеспечивают основную пористость и проницаемость коллектора;
- поровый трещины не обеспечивают дополнительной пористости и проницаемости, но формируют значительную анизотропию коллектора. Связывая выделяемые типы коллектора с суще-

связывая выделяемые типы коллектора с существующими классификациями интенсивности поглощения промывочной жидкости [19–21], можно сформировать качественную характеристику последовательности чередования литологической фильтрационно-емкостной неоднородности разреза, вскрываемого горизонтальной скважиной H6 (рис. 2, *a*). К поровому типу коллектора относятся интервалы с поглощением до 10 м<sup>3</sup>/сут. К трещинному типу – интервалы с поглощением 10–26 м<sup>3</sup>/сут., к порово-трещинному – интервалы без выхода циркуляции и к кавернозно-трещиноватому – интервалы с полной потерей циркуляции.

На рис. 2, б представлены варианты разработки залежи массивного типа слоисто-складчатого резервуара скважинами различного профиля проходки. Как следует из рисунка, с учётом фильтрационно-емкостных свойств (ФЕС) неоднородного коллектора наиболее полный охват залежи по площади будет осуществлён горизонтальной скважиной.



- Рис. 1. Сейсмический разрез палеозойского комплекса (а) и прогнозная модель залежи нефти пласта М1 (б) кровли фундамента Арчинской площади: 1 насыщение коллектора: а нефть, б вода; 2 направление движения флюида; 3 ствол эксплуатационной скважины; 4 прослои без коллектора (а) и с низкими коллекторскими свойствами и высокой водонасыщенностью в пределах залежи (б); 5 активный (пластовый) водонапорный режим массивной залежи углеводородов; 6 пассивный (межпластовый) водонапорный режим массивной залежи углеводородов; 6 пассивный (межпластовый) водонапорный режим массивной залежи углеводородов; 6 пассивный (межпластовый) водонапорный режим массивной залежи углеводородов; 7 отражающий горизонт І–ІІ в породах фундамента (элементы для построения условного отражающего структурного горизонта); 8 погружение (а) и поднятие (б) крупных блоков фундамента; 9 возрастные определения в скважине; 10 разведочные скважины; 11 тектонические нарушения; 12 –сейсмическая граница кровли палеозойского фундамента; 13 возраст тектонического блока; 14 последовательность напластования пород в разрезе и плане; 15 проекция отметок глубин условной структурной поверхности фундамента на кровлю пласта М1, соответствующая литологической неоднородности эрозионно-тектонической поверхности фундамента
- Fig. 1. Seismic section of the Paleozoic complex (a) and the forecast model of M1 reservoir oil deposits (6) of the roof of the Archinskaya area foundation: 1 reservoir saturation: a oil, b water; 2 fluid movement direction; 3 production well trunk; 4 interlayers without a reservoir (a) and with low reservoir properties and high water saturation within the reservoir (b); 5 active (reservoir) water pressure regime of a massive hydrocarbon deposit; 6 passive (interplastic) water pressure regime of a massive hydrocarbon deposit; 7 reflecting horizons I–II in the basement rocks (elements for constructing a conditional reflecting structural horizon); 8 sinking (a) and lifting (b) large foundation blocks; 9 age determinations in the well; 10 exploration wells; 11 tectonic disturbances; 12 seismic boundary of the roof of the Paleozoic foundation; 13 age of the tectonic block; 14 sequence of stratification of rocks in section and plan; 15 projection of the depth marks of the conditional structural surface of the foundation onto the roof of the M1 formation, corresponding to the lithological heterogeneity of the erosion-tectonic surface of the foundation





- **Рис. 2.** Профиль поглощения промывочной жидкости в горизонтальной скважине H6 (a) и связь интенсивности поглощения с типом продуктивного коллектора (b). Типы коллектора: 1 трещинно-каверновый, 2 трещинный, 3 порово-трещинный, 4 поровый; 5 порода не коллектор; 6 интенсивность притока нефти в скважину; 7 нефтяная часть залежи; 8 водоносная часть залежи; 9 скважина, её профиль
- **Fig. 2.** Absorption profile of the washing liquid in a horizontal well H6 (a) and the relationship of absorption intensity with the type of productive collector (b). Reservoir types: 1 fractured-cavernous, 2 fractured, 3 porous-fractured, 4 porous, 5 non-reservoir; 6 intensity of oil flow into the well; 7 oil part of the deposit; 8 aquifer part of the deposit; 9 well, its profile

Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2025. Т. 336. № 5. С. 132–143 Белозеров В.Б. и др. Особенности эксплуатации массивной залежи нефти пласта М1 палеозойского фундамента ...



Рис. 3. Систематизация профилей притока горизонтальных скважин пласта М1 Арчинской площади: 1 – тектонические блоки фундамента; 2 – положение водонефтяных (а), газонефтяных (б) контактов, зона газовой залежи (в); 3 – тектонические нарушения по данным сейсморазведки; 4 – изогипсы условного отражающего горизонта I–II в породах фундамента без учёта его блокового строения; 5 – скважины вертикальные (а) и горизонтальные (б) с профилем поглощения; 6 – зона возможного развития коллектора пятого типа

**Fig. 3.** Systematization of inflow profiles of horizontal wells of the M1 Archinskaya area reservoir: 1 – tectonic blocks of the foundation; 2 – position of the water-oil (a), gas-oil (b) contacts, gas deposit zone (c); 3 – tectonic disturbances according to seismic survey data; 4 – isogypses of the conditional reflecting horizons I–II in the basement rocks; 5 – vertical (f) and horizontal wells with absorption profile (b); 6 – zones of possible development of the fifth type collector

В то же время необходимо учитывать морфологию реконструируемой палеозойской складчатой структуры. В условиях литологической неоднородности разреза пород фундамента бурение горизонтальных скважин целесообразно в крыльевых, а вертикальных – в сводовых и синклинальных частях складки (рис. 1,  $\delta$ ). При бурении горизонтальных скважин необходимо учитывать и блоковую неоднородность фундамента, располагая их в пределах одновозрастных блоков.

#### Анализ разработки залежи нефти пласта М1

Особенности геологического строения пласта М1 Арчинского месторождения представлены в работах [22–27]. На базе публикации [25] выполнен анализ разработки залежи нефти эксплуатационным фондом горизонтальных скважин.

В соответствии с условной структурной основой I-II палеозойского фундамента, построенной по отражающим горизонтам I и II (рис. 1, *a*), рассматриваемый фонд эксплуатационных горизонтальных скважин расположен в пределах крыльевых зон и межструктурной седловины (тектонический блок 5) антиклинальной складки Арчинского поднятия (рис. 3).

Эксплуатация залежи нефти пласта М1 Арчинской площади, проводимая на естественном водонапорном режиме с ограничением начальных дебитов, в условиях слоистой фильтрационноемкостной неоднородности пород складчатого фундамента должна характеризоваться разной интенсивностью притока флюида отдельных прослоев при снижении давления в скважине.

При этом тенденция снижения общего дебита горизонтальной скважины во времени осложняется различием в количественном соотношении дебита нефти и воды на определенных этапах разработки. Это связано с разной обводнённостью разрабатываемых прослоев и их возможным «отключением» в процессе эксплуатации.

Учитывая «выход» на эрозионно-тектоническую поверхность породно-слоевой неоднородности складчатого фундамента, расположенные рядом горизонтальные скважины могут вскрывать одноимённые породные слои. Это в процессе эксплуатации может отражаться во взаимном влиянии работы скважин.

Рассматривая взаимосвязь рядом расположенных скважин в процессе их эксплуатации, можно выделить три типа взаимодействия: первый – однонаправленный, согласный во времени, характеризуется однонаправленными изменениями дебита нефти и обводнённости на конкретных временных интервалах разработки. Второй – разнонаправленный, согласный во времени, характеризуется разнонаправленными изменениями дебита нефти и обводнённости на конкретных временных интервалах разработки. Третий тип – блокирующий, характеризуется перераспределением дебитов нефти и обводнённости между работающими скважинами. Фрагментарно первый тип отмечается в скважинах третьего блока, первый и второй типы – в первом блоке и третий – в скважинах четвёртого блока (рис. 3).

Анализируя основные профили добычи нефти и обводнённости пласта М1 по горизонтальным скважинам (рис. 3) за четырёх-шестилетний период разработки залежи с позиции выделяемых типов коллектора, можно отметить следующее:

Первый тип - классический - характеризуется последовательным снижением во времени дебита нефти при нарастающей обводнённости продукции. Рассматриваемый тип, скорее всего, соответствует эксплуатации преимущественно трещиннокавернового, порово-трещинного и порового коллектора в зависимости от величины начальной продуктивности скважин. Из 35 скважин, отнесённых к данному типу, в 14 скважинах отмечались интервалы поглощения. Особенно значимо эти процессы проявили себя в серых до чёрных органогенных известняках надежденской свиты и серых массивных органогенных известняках лугинецкой свиты второго блока. Отсутствие поглощения характерно для чёрных, тёмно-серых аргиллитов и глинистых известняков армичевской свиты (нижний девон) седьмого и девятого блоков.

Факт наличия интервалов поглощения в разрезах скважин первого типа свидетельствует о неоднородности ФЕС продуктивного резервуара. При этом в процессе эксплуатации интервалы с повышенными ФЕС (трещинно-кавернозно-поровый коллектор) будут отрабатываться более интенсивно и обводняться за счёт формирования воронки депрессии в залежи массивного типа. Остановка скважины может способствовать расформированию воронки депрессии, что позволит поддерживать продуктивность скважины при циклическом режиме её эксплуатации. Эффективность циклического режима разработки будет зависеть от процесса поддержания пластового давления в залежи. Учитывая массивный тип залежи в пределах выделяемых тектонических блоков, закачку воды более рационально проводить в погруженных участка кровли пласта М1 с целью последовательного продвижения водо-нефтяного контакта в гипсометрические приподнятые зоны.

Второй тип – инверсионный – отражает совместную работу трещинно-порово- кавернового и трещинного коллектора. На первом этапе для выделяемых типов коллекторов отмечается совместный приток нефти. На втором этапе наблюдается обводнение трещинного коллектора, что отражается в снижении дебитов нефти и увеличении процента обводнённости продукции. На третьем этапе, вероятно, происходит закрытие трещин в трещинном коллекторе вследствие понижения пластового давления. В результате этого обводнённость снижается, а дебит нефти увеличивается. Последовательность рассматриваемых этапов может повторяться во времени. Из 13 скважин рассматриваемого типа поглощение во время бурения отмечалось в девяти скважинах, приуроченных в основном к отложениям надежденской свиты.

Пространственное переслаивание высокопродуктивных и трещиноватых коллекторов в скважинах второго типа также предполагает, по аналогии с первым типом, проведение циклической эксплуатации в случае снижения дебита нефти при высокой обводнённости продукции и поддержание пластового давления.

Третий тип – консервативный – определяет режим эксплуатации трещинного коллектора с последовательным «закрытием» зон трещиноватости до значительного снижения притока нефти в условиях низкой обводнённости, что отражается в постепенном снижении дебита нефти на фоне незначительной обводнённости. В пределах Арчинской площади отмечается две скважины рассматриваемого типа в отложениях лугинецкой свиты второго и пятого блоков.

Активизация эксплуатации скважин третьего типа требует повышения пластового давления в зоне дренирования.

Четвёртый тип – классический, для которого период резко падающей добычи нефти на начальном этапе сопровождается в дальнейшем значительным ростом обводнённости продукции. Этот профиль возможен для резервура с определённым сочетанием кавернозно-трещинно-порового и трещинного коллектора с преобладанием последнего, где снижение добычи нефти из трещинного коллектора при понижении пластового давления в дальнейшем сопровождается ростом обводнения по кавернозно-трещинно-поровому коллектору. Так, в скважине Н6 проходка по поровому коллектору составила 46 м, порово-трещинному – 10 м, кавернозно-трещинному - 4 м и трещинному с различной интенсивности поглощения - 105 м (рис. 2, 3, скв. Нб). Рассматриваемый тип отмечается для скважин второго и первого блоков. Из семи скважин рассматриваемого типа в шести отмечались поглощения промывочной жидкости в процессе бурения.

Пятый тип – классический с высокой начальной обводнённостью и запуском на ЭЦН – характеризует высокую начальную водонасыщенность продуктивного пласта. Это может быть обусловлено гидрофобизацией коллектора (скв. A08), его низкими фильтрационно-емкостными свойствами, близостью водонефтяного контакта (блок 2, 8) и наличием тектонического нарушения, что способствует поступлению пластовой воды из нижележащих горизонтов (блок 2, 3, 7). Данный тип характерн для отложений лугинецкой, надежденской, армичевской свит и выделен в 17 скважинах, из которых в восьми отмечалось поглощение промывочной жидкости.

Пример систематизации эксплуатационных скважин по выделяемым типам притока для скважин третьего тектонического блока показан на рис. 4.



Рис. 4. Систематизация профилей притока нефти и воды для скважин третьего блока
 Fig. 4. Systematization of oil and water inflow profiles for

**ig. 4.** Systematization of oil and water inflow profiles for wells of the third block

Рассматривая эффективность разработки пласта М1 горизонтальным фондом скважин следует отметить, что в складчато-слоистой модели резервуара отдельная скважина охватывает приток из совокупности коллекторов с различными фильтрационно-емкостными свойствами. Анализ пространственного положения интервалов выделяемой разновидности коллекторов в процессе проведения мониторинга профиля притока в горизонтальной скважине позволяет определить обводнённые интервалы с целью их последующей изоляции.

Исследуя режим эксплуатации вертикальных скважин, бурение которых предполагается в сводовых и синклинальных участках палеозойской складки, следует обратиться к опыту раз работки пласта М1 Малоичского нефтяного месторождения (Новосибирская область). Проведённые в 2013–2014 гг. на месторождении форсированные отборы жидкости показали высокую эффективность, обеспечив рост дебита нефти и снижение обводнённости продукции [28]. Рассматриваемая эффективность может быть связана с выводом из эксплуатации обводнённых коллекторов трещинного типа и интенсивной отработкой кавернознопорово-трещинных прослоев.

#### Выводы

Анализ разработки залежи нефти массивного типа пласта М1 горизонтальным фондом эксплуатационных скважин в складчато-блоковой модели палеозойского фундамента Арчинской площади позволяет сделать следующие выводы:

- Наблюдаемая интенсивность поглощения промывочной жидкости в процессе бурения горизонтального стола скважины обусловлена наличием различных типов коллекторов (кавернозно-трещинный, порово-трещинный, трещинный, поровый).
- В зависимости от литологического строения осадочной толщи и особенностей чередования прослоев с различными ФЕС в горизонтальной скважине можно выделить пять типов профилей притока, характеризующих динамику изменения во времени дебита нефти и обводнённости. При этом:
  - для первого тип классического, характерно последовательное снижение во времени дебита нефти при нарастающей обводнённости

продукции, что соответствует эксплуатации преимущественно трещинно-кавернового, порово-трещинного и порового коллектора в зависимости от величины начальной продуктивности скважин;

- для второго типа инверсионного, характерна периодическая смена увеличения дебитов нефти и обводнённости, что характеризует совместную работу трещинно-поровокавернового и трещинного коллектора;
- для третьего типа консервативного, свойственен режим эксплуатации трещинного коллектора, что отражается в последовательном снижении дебита нефти при низкой обводнённости продукции;
- для четвёртого типа классического, с падающей добычей нефти на начальном периоде разработки и последующей обводнённостью продукции, характерна совместная эксплуатация коллекторов порового и трещинного типа;
- для пятого типа классического, с высокой начальной оводнённостью и запуском на ЭЦН, возможен ряд факторов, контролирующих динамику добычи. К ним можно отнести гидрофобный тип коллектора, его низкие ФЕС, близость водонефтяного контакта и тектонического нарушения.
- Для всех выделенных типов (исключая пятый) с целью повышения эффективности работы горизонтальной скважины следует использовать циклический метод её эксплуатация с реализацией мероприятий по поддержанию пластового давления.
- Для оперативной изоляции обводненного прослоя в разрезе горизонтальной скважины необходимо проводить мониторинг профиля притока.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- The western part of the West Siberian petroleum megabasin: geologic history and structure of the basement / K.S. Ivanov, V.A. Koroteev, M.F. Pecherkin, Y.N. Fedorov, Y.V. Erokhin // Russian Geology and Geophysics. – 2009. – Vol. 50. – № 4. – P. 365–379. DOI: 10.1016/j.rgg.2009.03.
- Kontorovich V.A. Petroleum potential of reservoirs at the Paleozoic-Mesozoic boundary in West Siberia seismogeological criteria (example of the Chuzik-Chizhapka regional oil-gas accumulation) // Russian Geology and Geophysics. 2007. Vol. 48. № 5. P. 422–428. DOI: 10.1016/j.rgg.2007.05.002.
- 3. Prishepa O.M., Sinita N.V. Prospects for oil and gas bearing potential of Paleozoic basement of West Siberian sedimentary basin // International Journal of Engineering. 2025. Vol. 38. № 5. P. 520–534. DOI: 10.5829/ije.2025.38.05b.12
- Geological structure and historical development of Pre-Jurrasic basement of West Siberia oil- and gas-bearing megabasin Karabash Zone / K.S. Ivanov, N.P. Kostrov, Y.V. Erokhin, V.S. Ponomarev // Open Journal of Geology. – 2022. – Vol. 12. – № 10. – P. 717–738. DOI: 10.4236/ojg.2022.1210034
- 5. On the nature of Paleozoic oil deposits and their exploratory "reflection" in the geophysical section of the Jurassic layers (southeast of Western Siberia) / V.I. Isaev, A.O. Aleeva, G.A. Lobova, O.S. Isaeva, V.I. Starostenko // Geofizicheskiy Zhurnal. 2021. № 3. P. 93–128. DOI: 10.24028/gzh.0203-3100.v43i1.2021.225502.
- 6. Krutenko M.F., Isaev V.I., Lobova G. The Paleozoic oil in the Urman field (the southeast of Western Siberia) // Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones. 2023. Vol. 7 № 3. P. 243–263. DOI: 10.30730/gtrz.2023.7.3.243-263.
- 7. Новые данные о геологическом строении и продуктивности доюрского комплекса Средне-Назымского месторождения / В.Д. Шмаков, Н.Р. Касков, А.А. Бакулин, А.П. Шорохова // Георесурсы. 2023. Т. 25. № 3. С. 111–118. doi.org/10.18599/grs.2023.3.14

- 8. Новые подходы к изучению нефтегазового потенциала доюрских отложений Западно-Сибирской нефтегазовой провинции / В.В. Хараханов, Н.М. Кулишкин, С.И. Шлёнкин, А.В. Олюнин // Геология нефти и газа. 2015. № 6. С. 63–77.
- Paleozoic of West Siberia geological structure, oil and gasbearing, seismogeological models of oil and gas fields / V. Kontorovich, L. Kalinina, A. Kalinin, M. Soloviev // Conference Proceedings Geomodel. – September 2018. – Vol. 2018. – P. 1–5. DOI: 10.3997/2214-4609.201802402
- Geological structure of the Pre-Jurassic basement of the Yugansk-Koltogorsk zone of the West Siberia / K.S. Ivanov, S.V. Berzin, N.V. Vakhrusheva, N.P. Kostrov, O.E. Pogromsk // Lithosphere. – 2018. – № 6. – P. 839–858. DOI:10.24930/1681-9004-2018-18-6-839-858
- Geological structure of the basement of western and eastern parts of the West-Siberian / K. Ivanov, V. Erokhin, V. Ponomarev, O. Pogromskaya, S. Berzin // International journal of environmental and science education. – 2016. – Vol. 11. – № 14. – P. 6409–6432.
- 12. Белозеров В.Б., Силкин Г.Е. Критерии переоценки перспектив нефтегазоносности коллекторных зон фундамента юговостока Западной Сибири // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2022. Т. 333. № 2. С. 7–14. DOI: 10.18799/24131830/2022/2/3559
- 13. Ковешников А.Е., Недоливко Н.М. Вторично-катагенетические преобразования доюрских пород Западно-Сибирской геосинеклизы // Известия Томского политехнического университета. 2012. Т. 320. № 1. С. 82–86.
- 14. Ежова А.В. Генезис пустотного пространства и емкостно-фильтрационные свойства палеозойских коллекторов месторождений углеводородов омской области // Геология нефти и газа. 2007. № 3. С. 18–22.
- 15. Litho-geophysical structure of Paleozoic-Mesozoic contact zones in North-Ostaninsk oil field (Tomsk Oblast) / A.V. Ezhova, V.P. Merkulov, V.A. Chekanstev, R.A. Abramova // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2015. – № 24. – P. 012013. DOI: 10.1088/1755-1315/24/1/012013
- 16. Уразова Е.С., Недоливко Н.М. Особенности формирования пустотного пространства в карбонатных коллекторах Арчинского нефтегазоконденсатного месторождения // Проблемы геологии и освоения недр: Труды XXIII Международного симпозиума имени академика Усова. – Томск, 2019. – Т. 1. – С. 264–266.
- 17. Нгуен Хыу Б. Геофизические исследования скважин при изучении магматических коллекторов месторождения Белый Тигр // Известия Томского политехнического университета. 2013. Т. 323. № 1. С. 27–33.
- Промысловая классификация трещиноватых коллекторов кристаллического фундамента / А.И. Щекин, В.А. Васильев, А.С. Николайченко, А.В. Коломийцев // Георесурсы. – 2021. – Т. 23. – № 3. – С. 90–98. DOI: https://doi.org/10.18599/grs.2021.3.12
- 19. Терентьев С.Э., Богданов Б.П. Особенности определения насыщения зон поглощения промывочной жидкостью в карбонатных постройках Тимано-Печорской провинции // Нефтегазовое дело. 2013. № 2. С. 123–148.
- 20. Картин Д.Ю. Поглощение бурового раствора риск возникновения явления ГНВП // Журнал «Трибуна Учёного». 2020. Вып. 12. С. 168–174.
- Габдулин Р.Х., Липатов А.В. Классификация тампонажных смесей для ликвидации зоны поглощения бурового раствора // Вестник ассоциации буровых подрядчиков. Международный журнал гуманитарных и естественных наук. – 2024. – Вып. 10-1 (97). – С. 149–153. DOI: 10.24412/2500-1000-2024-10-1-149-153.
- 22. Жуковская Е.А., Лапушняков Ю.В. Применение рентгеновской томографии при типизации негранулярных коллекторов на примере Урманского месторождения // Нефтяное хозяйство. 2006. № 8. С. 24–27.
- 23. Геолого-геофизическая характеристика и генезис доюрских отложений Урмано-Арчинской площади / Е.Н. Главнова, М.А. Тугарова, Е.А. Жуковская, М.А. Буторина // Нефтяное хозяйство. 2015. № 6. С. 33–37.
- 24. Особенности геологического строения и разработки Арчинского месторождения / Е.Н. Главнова, Е.А. Жуковская, Д.Н. Дмитрук, М.А Буторина и др. // Нефтяное хозяйство. 2014. № 2. С. 110–113.
- Белозеров В.Б., Коровин М.О. Структурно-тектонические особенности строения и нефтегазоносность пласта М1 отложений палеозойского фундамента Арчинской площади (Западная Сибирь) // Записки Горного института. – 2024. – Т. 268. – С. 520–534.
- 26. Куприянова К.А. Геологические факторы прогноза продуктивности скважин в карбонатном коллекторе // Проблемы геологии и освоения недр. Томск: Изд-во ТПУ, 2023. Т. 2. С. 51–53.
- 27. Реконструкция истории тектонического развития Нюрольской впадины на основе Sandbox экспериментов / К.А. Малхасян, Д.В. Коношонкин, А.С. Шадрин и др. // Известия УГГУ. 2022. Вып. 2 (66). С. 59–70. DOI: 10.21440/2307-2091-2022-2-59-70
- 28. Разработка палеозойских отложений на Малоичском нефтяном месторождении / А.Н. Янин, М.С. Павлов, Д.Р. Галеев, А.В. Барышников // Бурение и нефть. 2015. № 7. С. 48–53.

#### Информация об авторах

Владимир Борисович Белозеров, доктор геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. BelozerovVB@hw.tpu.ru; https://orcid.org/0000-0003-1330-7485

**Диана Маратовна Овчаренко**, аспирант отделения нефтегазового дела Школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. dmo4@tpu.ru

**Любовь Афанасьевна Краснощёкова**, кандидат геолого-минералогических наук, доцент отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехни-

ческого университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. Krasnl@tpu.ru; https://orcid.org/0000-0002-6444-9494

Юлия Андреевна Ужегова, инженер лаборатории геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 635050, г. Томск, пр. Ленина, 30. uzhegovaya@hw.tpu.ru; https://orcid.org/0000-0002-4658-6399

Поступила в редакцию: 21.02.2025 Поступила после рецензирования: 24.03.2025 Принята к публикации: 10.04.2025

#### REFERECES

- 1. Ivanov K.S., Koroteev V.A., Pecherkin M.F., Fedorov Y.N., Erokhin Y.V. The western part of the West Siberian petroleum megabasin: geologic history and structure of the basement. *Russian Geology and Geophysics*, 2009, vol. 50, no. 4, pp. 365–379. DOI: 10.1016/j.rgg.2009.03.010
- Kontorovich V.A. Petroleum potential of reservoirs at the Paleozoic-Mesozoic boundary in West Siberia seismogeological criteria (example of the Chuzik-Chizhapka regional oilgas accumulation). *Russian Geology and Geophysics*, 2007, vol. 48, no. 5, pp. 422–428. DOI: 10.1016/j.rgg.2007.05.002.
- Prishepa O.M., Sinita N.V. Prospects for oil and gas bearing potential of Paleozoic basement of West Siberian sedimentary basin. *International Journal of Engineering*, 2025, vol. 38, no. 5, pp. 520–534. DOI: 10.5829/ije.2025.38.05b.12
   Ivanov K.S., Kostrov N.P, Erokhin Y.V., Ponomarev V.S. Geological structure and historical development of Pre-Jurrasic
- Ivanov K.S., Kostrov N.P, Erokhin Y.V., Ponomarev V.S. Geological structure and historical development of Pre-Jurrasic basement of West Siberia oil- and gas-bearing megabasin Karabash Zone. *Open Journal of Geology*, 2022, vol. 12, no. 10, pp. 717–738. DOI: 10.4236/ojg.2022.1210034
- Isaev V.I., Aleeva A.O., Lobova G.A., Isaeva O.S., Starostenko V.I. On the nature of Paleozoic oil deposits and their exploratory "reflection" in the geophysical section of the Jurassic layers (southeast of Western Siberia). *Geofizicheskiy Zhurnal*, 2021, no. 3. pp. 93–128. DOI: 10.24028/gzh.0203-3100.v43i1.2021.225502.
- 6. Krutenko M.F., Isaev V.I., Lobova G. The Paleozoic oil in the Urman field (the southeast of Western Siberia). *Geosistemy* perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones, 2023, vol. 7, no. 3, pp. 243–263. DOI: 10.30730/gtrz.2023.7.3.243-263
- Shmakov V.D., Kaskov N.R., Bakulin A.A., Shorokhova A.P. Geological structure and reservoir productivity of Pre-Jurassic basement rocks of the Sredne-Nazymskoye oil field (Western Siberia). *Georesources*, 2023, vol. 25, no. 3, pp. 111–118. (In Russ.) DOI: doi.org/10.18599/grs.2023.3.14.
- 8. Kharakhanov V.V., Kulishkin N.M., Shlenkin S.I., Olyunin A.V. New approaches to the study of the oil and gas potential of the Pre-Jurassic deposits of the West Siberian oil and gas province. *Geology of Oil and Gas*, 2015, no. 6, pp. 63–77. (In Russ.)
- Kontorovich V., Kalinina L., Kalinin A., Soloviev M. Paleozoic of West Siberia geological structure, oil and gasbearing, seismogeological models of oil and gas fields. *Conference Proceedings Geomodel*, 2018, vol. 5, pp. 1–5. DOI: 10.3997/2214-4609.201802402
- Ivanov K.S., Berzin S.V., Vakhrusheva N.V., Kostrov N.P., Pogromsk O.E. Geological structure of the Pre-Jurassic basement of the Yugansk-Koltogorsk zone of the West Siberia. *Lithosphere*, 2018, no. 6, pp. 839–858. DOI:10.24930/1681-9004-2018-18-6-839-858
- 11. Ivanov K., Erokhin V., Ponomarev V., Pogromskaya O., Berzin S. Geological structure of the basement of western and eastern parts of the West-Siberian. *International journal of environmental & science education*, 2016, vol. 11, no. 14, pp. 6409–6432.
- Belozerov V. B., Silkin G.E. Criteria for revaluation of oil and gas potential of reservoir zones of the basement of the South-east of Western Siberia. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, no. 2, pp. 7–14. C. 7–14. DOI: 10.18799/24131830/2022/2/3559 (In Russ.)
- 13. Koveshnikov A.E., Nedelivko N.M. Secondary-catagenetic transformations of pre-Jurassic rocks of the West Siberian geosyneclise. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2012, vol. 320, no. 1, pp. 82–86. (In Russ.)
- 14. Ezhova A.V. The genesis of void space and reservoir filtration properties of Paleozoic reservoirs of hydrocarbon deposits in the Tomsk region. *Geology of Oil and Gas*, 2007, no. 3, pp. 53–57. (In Russ.)
- Ezhova A.V., Merkulov V.P., Chekanstev V.A., Abramova R.A. Litho-geophysical structure of Paleozoic-Mesozoic contact zones in North-Ostaninsk oil field (Tomsk Oblast). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2015, vol. 24, pp. 012013. DOI: 10.1088/1755-1315/24/1/012013.
- 16. Urazova E.S., Nedelivko N.M. Features of void space formation in carbonate reservoirs of the Archinsky oil and gas condensate field. Problems of geology and subsoil development. Proc. of the XXIII International Symposium named after Academician Usov. Tomsk, 2019. Vol. 1, pp. 264–266. (In Russ.)
- 17. Nguyen Huu B. Geophysical studies of wells in the study of magmatic reservoirs of the White Tiger deposit. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2013, vol. 323, no. 1, pp. 27–33. (In Russ.)
- 18. Shchekin A.I., Vasiliev V.A., Nikolaichenko A.S., Kolomiytsev A.V. Commercial classification of fractured reservoirs of crystalline basement. *Georesources*, 2021, vol. 23, no. 3, pp. 90–98. DOI: https://doi.org/10.18599/GRS.2021.3.12. (In Russ.)
- 19. Terentyev S.E., Bogdanov B.P. Features of determining the saturation of the absorption zones of the washing liquid in the carbonate buildings of the Timan-Pechersk province. *Oil and gas business*, 2013, no. 2, pp. 123–148. (In Russ.)
- 20. Kartins D.Y. Absorption of drilling mud the risk of occurrence of the phenomenon of GNVP. *Journal "Tribune of the Scientist"*, 2020, Iss. 12, pp. 168–174. (In Russ.)
- Gabdulin R.Kh., Lipatov A.V. Classification of grouting mixtures for the elimination of the absorption zone of drilling mud. Bulletin of the Association of Drilling Contractors. International Journal of Humanities and Natural Sciences, 2024, Iss. 10-1 (97), pp. 149–153. DOI: 10.24412/2500-1000-2024-10-1-149-153. (In Russ.)

- 22. Zhukovskaya E.A., Lapushnyakov Yu.V. The use of X-ray tomography in the typification of non-granular reservoirs on the example of the Urmanskoe deposit. *Oil industry*, 2006, no. 8, pp. 24–27. (In Russ.)
- 23. Glavnova E.N., Tugarova M.A. Zhukovskaya E.A., Butorina M.A. Geological and geophysical characteristics and genesis of the pre-Jurassic deposits of the Urman-Archinskaya area. *Oil industry*, 2015, no. 6, pp. 33–37. (In Russ.)
- 24. Glavnova E.N., Zhukovskaya E.A., Dmitruk D.N., Butorina M.A. Features of the geological structure and development of the Archinskoye field. *Oil Industry*, 2014, no. 2, pp. 110–113. (In Russ.)
- 25. Belozerov V.B., Korovin M.O. M1 formation tectono-structural features and gas oil potential within Archinskaya area Paleozoic basement (Western Siberia). *Journal of Mining Institute*, 2024, vol. 268, pp. 520–534. (In Russ.)
- 26. Kupriyanova K.A. Geological factors of forecasting well productivity in a carbonate collector. *Problems of geology and subsoil* development. Tomsk, TPU Publ. House, 2023. Vol. 2, pp. 51–53. (In Russ.)
- 27. Malkhasyan K.A., Konoshonkin D.V., Shadrin A.S. Reconstruction of the history of the tectonic development of the Nyrol depression based on Sandbox experiments. *Izvestiya UGGU*, 2022, Iss. 2 (66), pp. 59–70. (In Russ.)
- 28. Yanin A.N., Pavlov M.S., Galeev D.R., Baryshnikov A.V. Development of Paleozoic deposits at the Maloichskoye oil field. *Drilling and oil*, 2015, no. 7–8, pp. 48–53. (In Russ.)

#### Information about the authors

**Vladimir B. Belozerov**, Dr. Sc., Head of the Laboratory of Geology, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. belozerovvb@hw.tpu.ru; https://orcid.org/0000-0003-1330-7485

**Diana M. Ovcharenko**, Postgraduate Student, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. dmo4@tpu.ru

**Lyubov A. Krasnoshchekova**, Cand. Sc., Associate Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russin Federation. Krasnl@tpu.ru; https://orcid.org/0000-0002-6444-9494

**Yulia A. Uzhegova**, Engineer, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. uzhegovaya@hw.tpu.ru; https://orcid.org/0000-0002-4658-6399

Received: 21.02.2025 Revised: 24.03.2025 Accepted: 10.04.2025 УДК 556.314.6(282.256.1) DOI: 10.18799/24131830/2025/5/5044 Шифр специальности ВАК: 1.6.4, 1.6.6, 1.6.21 Научная статья

## Оценка притока подземных вод в Среднюю Обь и ее основные притоки

## О.Г. Савичев⊠

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск

<sup>™</sup>osavichev@mail.ru

Аннотация. Актуальность определяется необходимостью более точной, по сравнению с используемыми способами, оценки подземной составляющей речного стока как основы для оценки ресурсов подземных вод и решения ряда гидроэкологических задач. Цель: разработка методики и собственно оценка подземной составляющей речного стока реки Оби на участке ее среднего течения с использованием гидрогеологических и гидрологических данных. Методы: методы математического моделирования, статистические методы. Результаты и выводы. На основе анализа гидрогеологических и гидрологических материалов за условно однородный период 1995-2015 гг. разработана методика оценки подземной составляющей речного стока в пределах Западно-Сибирской равнины по данным о среднемесячных расходах и уровнях речных вод в зимнюю межень и уровнях подземных вод (в зоне активного водообмена). Методика максимально адаптирована к требованиям действующего Российского законодательства, включает в себя анализ гидрогеохимического баланса и определение методами математической статистики и оптимизации параметров, которые соответствуют коэффициенту фильтрации и удельному притоку подземных вод. Методика апробирована на примере Оби и крупных притоков на участке ее среднего течения. Установлено, что в большинстве случаев средние и большие реки в пределах речных долин в целом характеризуются преобладанием нисходящего режима взаимодействия речных и подземных вод, а нижний предел определения подземной составляющей речного стока в первом приближении может быть рассчитан по речному гидрографу с использованием линейной интерполяции между стоком в марте и декабре. Показано, что гидрогеологические условия ранее (в верхнем меле и палеогене) могли способствовать (и способствуют в настоящее время) аккумуляции соединений железа в верхней гидродинамической зоне.

Ключевые слова: методика оценки, подземная составляющая речного стока, уровни подземных вод, Западная Сибирь, таежная зона

**Для цитирования**: Савичев О.Г. Оценка притока подземных вод в Среднюю Обь и ее основные притоки // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 5. – С. 144–158. DOI: 10.18799/24131830/2025/5/5044

UDC 556.314.6(282.256.1) DOI: 10.18799/24131830/2025/5/5044 Scientific paper

## Assessment of groundwater inflow into the Middle Ob river and its main tributaries

## 0.G. Savichev<sup>⊠</sup>

National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

<sup>⊠</sup>OSavichev@mail.ru

**Abstract.** *Relevance.* The need for a more accurate assessment of the underground component of river runoff as a basis for assessing groundwater resources and solving a number of hydroecological problems. *Aim.* To develop a methodology and actually assess of the underground component of the Ob river runoff in its middle reaches using hydrogeological and hydrological data.
*Methods.* Mathematical modeling, statistical methods. *Results and conclusions.* Based on the analysis of hydrogeological and hydrological materials for a conditionally homogeneous period of 1995–2015, a methodology has been developed for assessing the underground component of river runoff within the West Siberian Plain using data on average monthly discharges and river water levels in winter low water and groundwater levels (in the zone of active water exchange). The methodology is maximally adapted to the requirements of the current Russian legislation and includes an analysis of the hydrogeochemical balance and the determination of parameters that correspond to the filtration coefficient and specific groundwater inflow using mathematical statistics and optimization methods. The method was tested on the example of the Ob and large tributaries in its middle reaches. It was established that in most cases medium and large rivers are characterized by the prevalence of a descending mode of interaction between river and groundwater in general within river valleys, and the lower limit of determining the underground component of river runoff can be determined using linear interpolation between the flows in March and December. It was shown that hydrogeological conditions previously (in the Upper Cretaceous and Paleogene) could have contributed (and currently contribute) to the accumulation of iron compounds in the upper hydrogeodynamic zone.

Keywords: assessment method, underground component of river runoff, groundwater levels, Western Siberia, taiga zone

**For citation:** Savichev O.G. Assessment of groundwater inflow into the Middle Ob and its main tributaries. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 5, pp. 144–158. DOI: 10.18799/24131830/2025/5/5044

# Введение

Количественная оценка подземной составляющей речного стока, которая в первом приближении может рассматриваться как значительная часть подземного стока, является важным элементом сразу нескольких крупных научных и инженерных проблем – от выявления и прогноза долгосрочных изменений состояния окружающей среды и климата и оценки экологического стока до определения ресурсов и запасов подземных вод и условий функционирования подземных и поверхностных водозаборов [1–11]. Это определяет постоянный интерес к разработке методов оценки ресурсов и стока подземных вод, обзор которых достаточно полно представлен в работах [1, 2, 4, 6, 7, 12–20].

Многие из них сводятся к достаточно формальному расчленению гидрографа реки (в пределах водосбора которой оцениваются ресурсы подземных вод), исходя либо из физических представлений о времени добегания водных масс и истощения ресурсов подземных вод (при отсутствии значимой инфильтрации в зимнюю межень) с учетом геоморфологических условий, либо результатов визуального анализа гидрогеологического разреза и/или сопоставления гидрогеохимических материалов, причем иногда с попыткой анализа сразу нескольких уравнений гидрогеохимического баланса как по условно консервативным, так и по ярко выраженным неконсервативным веществам [21]. Также используются методы гидрогеодинамического моделирования, но в большинстве случаев их эффективность ограничена вследствие целого ряда допущений при определении начальных и граничных условий, например, при задании постоянного среднего минимального расхода и уровня воды в реке [1, 2, 12-16, 22-24].

Предпринимались и попытки использовать материалы наблюдений за уровнями подземных вод [14, 15, 18, 25–27], но до последнего времени не было необходимого понимания, как учитывать поступление в речную сеть подземных вод из водоносных отложений разного возраста, что и определило цели рассматриваемой работы – разработку методики и собственно оценку подземной составляющей речного стока реки Оби на участке среднего течения и ее основных равнинных притоков на основе сопоставления уровней речных и подземных вод. Соответственно этим целям структура исследования включала (задачи исследования): выбор и анализ объектов изучения, разработку математической модели, моделирование подземного стока и анализ полученных результатов.

# Объекты и методика исследования

В качестве объектов исследования выбраны участки водосборов р. Оби у с. Александровское и ее притоков – рр. Тым (у с. Напас), Кеть (у пос. Белый Яр), Васюган (у с. Средний Васюган), Чая (у с. Подгорное), в пределах которых организовано водоснабжение из подземных источников, что определяет постоянную необходимость в достоверной оценке и переоценке ресурсов и запасов подземных вод. Указанные участки расположены в административном отношении в пределах Томской области (рис. 1, табл. 1), с учетом природного районирования – на равнинной таежной территории (в подзонах средней и южной тайги), и в первом приближении представляют собой поперечные профили водосборов, в пределах которых имеются гидрологические посты Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды Российской Федерации (Росгидромета; ранее - Госкомгидромета СССР) и режимные гидрогеологические скважины Сибирского регионального центра Федерального государственного бюджетного учреждения (СРЦ ФГБУ) «Гидроспецгеология (ранее на рассматриваемой территории - АО «Томскгеомониторинг», ОГУП Территориальный центр Томскгеомониторинг», Томская геолого-разведочная экспедиция).



Fig. 1. Layout of study sites (a) and schematic cross-section along the profile from the village of Rebrikha in the Altai Territory to the town of Strezhevoy (b); legend: 1 – hydrological observation points; 2 – hydrogeological observation points; point designations and well numbers are given in Table 1; 3 – position of schematic cross-section (b); types of bogs: I – low-land; II – transitional; III – upland; <KZ – underpaleogene deposit roof mark; KZ – Paleogene deposit roof mark; sf – surface mark, m BS; Tr1 and Tr2 are the southern and northern borders of Tomsk region; the schematic section is constructed according to the data of [27, 30–32, 34, 36, 37]; H is the elevation; L is the distance from the conventional beginning (boundary of the outcrop of Paleozoic deposits [31])</li>

Основные допущения (с учетом алгоритмов построения гидрогеологических моделей, согласно [16, 28]) при гидрогеологической схематизации заключаются в следующем:  непосредственные взаимодействия речных и подземных вод в значительной мере ограничены водоносными отложениями неоген-четвертичного и палеогенового возраста; в соответствии с положениями [29], к отложениям неогенчетвертичного возраста приурочен первый водоносный горизонт, к отложениям палеогена – второй и иные горизонты; по условиям залегания [4] в первом случае – грунтовые воды, в остальных – артезианские; взаимодействие речных вод с подземными водами в отложениях мезозоя минимальны и/или выражаются опосредованно через формирование ресурсов и химического состава напорных вод в отложениях палеогена;

2) первый и последующие (второй и иные, согласно терминологии [29]) водоносные горизонты отличаются друг от друга по фильтрационным свойствам и химическому составу вод, но между ними нет непрерывного по площади водоупора, вследствие чего допустимо выделение двух групп горизонтов (первая группа – первый горизонт; вторая группа – второй и иные горизонты) и использование в каждом случае уравнения Дюпюи [15, 28]; отсутствие сплошного водоупора между водоносными горизонтами и соответствующие различия между характеристиками подземных вод двух групп в целом подтверждаются материалами обобщений гидрогеологических исследований [30–39];

 при рассмотрении среднемноголетнего водного баланса территории изменение влагозапасов водосбора существенно не превышает погрешность определения, а годовые значения подземной составляющей примерно равны сумме значений инфильтрации и разницы притока и оттока подземных вод к расчетному профилю.

С учетом наличия данных наблюдений и указанных выше допущений рассмотрен статистически однородный период с середины 1990-х до середины 2010-х гг. Исходная информация – ранее опубликованные (в части исследования многолетних изменений режима подземных вод) материалы СРЦ ФГБУ «Гидроспецгеология» и Росгидромета [26, 27, 37, 39].

**Таблица 1.** Сведения об изученных пунктах гидрологических и гидрогеологических наблюдений (выборка данных [26, 27, 38, 39])

Подземные воды				Река 1, створ			Дополнительный Река 2, створ		)
Groundwater				River 1, section			створ на реке 1	River 2, section	
Пункт	Скважина	Отложения	$H_{gr(x)}$ ,	Наименование	$H_{r1}$ ,	<i>Q</i> <sub>r1</sub> , м <sup>3</sup> /с	Extra section on	Наименование	H <sub>r2</sub> ,
Point	Well	Deposits	м/m	Name	м/m	m³/s	the river 1	Name	м/m
с. Александро вское 124p Aleksan- drovskoe		1Qm	38,42	Обь у с. Александровское Ob at Aleksan- drovskoe (OA) 35,81 4882 Обь у c. Прохоркино Ob at Prokhorkin (OP)		Обь у с. Прохоркино Ob at Prokhorkino (OP)	Васюган у с. Средний Васюган Vasyugan at Sred- ny Vasyugan (VS)	55,54	
	123p	$1Q_{III}^*$	39,01	OA	35,81	4882	OP	VS	55,54
с. Напас Napas	156p	₽₃lg**	63,93	Тым у с. Напас Tym at Napas (TM)	63,93	205	Тым у п. Ванжиль-Кынак Tym at Vanzhil- Kynak (TV)	Кеть у c. Родионово Ket at Rodionov (KR)	61,57
	157p	₽₁pr	77,00	TM	63,93	205	TV	KR	61,57
с. Белый Яр Bely Yar	113p	2aQııı+Qııtb+N1	76,68	Кеть у п. Белый Яр Ket at Bely Yar (KB)	72,06	378	Кеть у п. Максимкин Яр Ket at Maksimkin Yar (KM)	Чулым у с. Батурино Chulym at Baturino (ChB)	75,41
	114p	₽3lg	77,09	KB	72,06	378	KM	ChB	75,41
с. Средний Васюган Sredny	169p	Qutb+2Quitb	60,08	VS	55,54	171	Васюган у п. Новый Васюган Vasyugan at Novy Vasyugan (VN)	OA	35,81
Vasyugali	167p	P <sub>2-3</sub> tv	61,06	VS	55,54	171	VN	OA	35,81
с. Подгорное Podgornoe	94p	1Q <sub>111</sub>	64,88	Чая у с. Подгорное Chaya at Podgornoe (ChP)	63,50	93	Чая у устья p. Икса Chaya at the mouth of the Iksa river (ChI)	Обь у с. Могочино Ob at Mogochino (OM)	60,19
	284p	P <sub>2</sub> jr+P <sub>3</sub> nm***	75,24	ChP	63,50	93	ChI	ОМ	60,19

Table 1. Information on the studied hydrological and hydrogeological observation points (data sample from [26, 27, 38, 39])

Примечание: возможен приток из отложений: \* палеогена  $P_{3(at+nm)}$ ; \*\* аллювиальных современных aQ; \*\*\* меловых K;  $H_{gr(x)}$  – уровень подземных вод в скважине на расстоянии х от реки 1;  $H_{r1}$  и  $Q_{r1}$  – среднемноголетние уровень и расход воды реки 1;  $H_{r2}$  – среднемесячный уровень воды реки 2.

Note: possible inflow from deposits: \* Paleogene  $P_{3(at+nm)}$ ; \*\* modern alluvial aQ; \*\*\* Cretaceous K;  $H_{gr(x)}$  is groundwater level in the well at a distance x from the river 1;  $H_{r1}$  and  $Q_{r1}$  are average monthly water level and discharge of the river 1;  $H_{r2}$  is an annual water level of the river 2.

Итеративный подбор структуры математической модели для оценки подземного стока представляет собой непосредственно одну из задач исследования. Поэтому структура модели изложена ниже в соответствующем разделе. Здесь лишь отметим, что параметры модели определялись методом наименьших квадратов (МНК) при условии (1) и уровне значимости 5 %, а также в результате поиска решения нелинейных задач методом общего понижающего градиента с использованием критериев (2), (3):

$$R^2 > 0,36; \ \frac{|r|}{\delta_r} \ge 2; \ \frac{|k_r|}{\delta_k} \ge 2, \ \delta_r \frac{1-r^2}{\sqrt{N-1}},$$
 (1)

$$Kr_{1} = \min \frac{\sqrt{\frac{(y_{o} - y_{m})^{2}}{N-1}}}{\sigma_{o}} \le 0, 8,$$
 (2)

$$Kr_2 = \min \frac{|y_o - y_m|}{y_o},$$
(3)

где N – объем выборки;  $R^2$  – квадрат корреляционного отношения; r и  $\delta_r$  – коэффициент корреляции и погрешность его определения;  $k_r$  и  $\delta_k$  – коэффициент регрессии и погрешность его определения [40];  $y_o$  и  $y_m$  – наблюденные и вычисленные значения величины  $y_o$ ; критерий Kr(1) представляет собой функцию критерия Нэша–Сатклифа [41], обычно используемую в практике гидрологических прогнозов в Российской Федерации [13]. Все расчеты выполнены в среде MS Excel.

### Структура модели

С учетом указанных выше допущений приток подземных вод в речную сеть на равнинной таежной части Западной Сибири ориентировочно составляет основную часть общего подземного стока в зоне активного водообмена в пределах кайнозойских отложений в зимнюю межень, когда роль инфильтрации после выпадения дождей и оттепелей ориентировочно находится в пределах погрешности определения. Тогда подземная составляющая речного стока в зимнюю межень q<sub>gr.w</sub> примерно равна удельному (по поперечному профилю) речному стоку  $q_{r,w}$  (m<sup>2</sup>/c) и суммарному притоку подземных вод из водоносных отложений неогенчетвертичного  $q_{O,w}$  и палеогенового  $q_{Pg,w}$  возраста и может быть рассчитана по уравнению (4), сток растворенных солей  $G_{r,w}$  (г/(м·с)) – по уравнению (5), а доля притока из различных горизонтов (6) – путем решения уравнений (4, 5):

$$q_{r,w} \approx q_{gr,w} = q_{gr,O,w} + q_{gr,P,w},\tag{4}$$

$$G_{r,w} \approx Q_{r,w} S_{r,w} \approx q_{gr,Q,w} S_{gr,Q} + q_{gr,P,w} S_{gr,P},$$
(5)

$$\beta_j = \frac{q_{j,w}}{Q_{r,w}},\tag{6}$$

примечание: фактически рассматривается сток главных ионов  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $HCO_3^-$ ,  $CO_3^{2-}$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $CI^-$ ; сумма главных ионов

$$S = [Ca^{2^+}] + [Mg^{2^+}] + [Na^+] + [K^+] + [HCO_3^-] + + [CO_3^{2^-}] + [SO_4^{2^-}] + [CI^-], r/m^3.$$

Еще одно допущение – приток подземных вод из первого или остальных водоносных горизонтов с одного из двух берегов реки определяется уравнением Дюпюи (7), где поступление вод в горизонт извне W (м/с; сумма инфильтрации *Inf* и разницы между притоком и оттоком подземных вод к профилю  $q_{gr}$  (8)) рассчитывается по соотношению среднемесячных уровней речных вод смежных рек ( $H_{r1}$  и  $H_{r2}$  в м Балтийской системы высот (БС);  $L_{12}$  – расстояние между смежными пунктами наблюдений на реках 1 и 2, м) и подземных вод  $H_{gr(x)}$  (в м БС) на расстоянии *x* от пункта 1 (9):

$$q_{1,j,i} = \frac{K_{f,i}}{2x} \Big( H_{r1,j,i}^2 - H_{gr(x),j,i}^2 \Big) - \frac{W_{j,i}x}{2}, \tag{7}$$

$$W_{j,i} = Inf_{j,i} + q_{gr,j,i}, \tag{8}$$

$$\gamma_{j,i} = \frac{W_{j,i}}{K_{f,j,i}} = \frac{H_{gr(x),j,i}^2 - H_{r1,j,i}^2}{\left(L_{12,i} - x\right)x} + \frac{H_{r1,j,i}^2 - H_{r2,j,i}^2}{\left(L_{12,i} - x\right)L_{12,i}},$$
(9)

где K<sub>f</sub> – осредненное по профилю значение коэффициента фильтрации, м/с; і – индекс берега (левый, правый); ј – индекс возраста водоносных отложений (первый водоносный горизонт в отложениях неоген-четвертичного возраста N-Q; второй и прочие водоносные горизонты - в отложениях палеогена Р). Тогда суммарный приток подземных вод из отложений *j* к реке 1 описывается уравнением (10), которое может рассматриваться как уравнение регрессии, параметры которого определяются методом наименьших квадратов для периода зимней межени в предположении того, что в остальную часть года параметры  $b_{q^*}$  и  $K_{f^*}$  (10) остаются постоянными в течение всего года. При этом суммарный приток подземных вод из первого (в отложениях неоген-четвертичного возраста) и иных (ориентировочно - в отложениях палеогенового возраста) горизонтов оценивается по уравнениям (10)-(12):

$$q_{1,j} = q_{1,j,lf} + q_{1,j,rr} \approx 2q_{1,j,i} + b_q =$$
  
=  $b_{q,j^*} - K_{f,j^*} \left( \frac{\left(H_{gr(x),j,i}^2 - H_{r1,j,i}^2\right)}{x} - \gamma_{j,i}x \right) \approx \beta_j Q_{r,w},$  (10)

$$q_1 = q_{1,N-Q} + q_{1,P}, \tag{11}$$

$$W_1 = W_{1,N-Q} + W_{1,P}, (12)$$

$$K_{f1} = \frac{1}{\frac{W_{1,N-Q}}{W_1} \frac{1}{K_{f,N-Q}} + \frac{W_{1,P}}{W_1} \frac{1}{K_{f,P}}},$$
(13)

где *b<sub>q</sub>* – функция разницы между инфильтрацией и притоком-оттоком подземных вод к расчетному профилю в русло реки 1 с левого и правого берегов;  $b_{q^*}$  и  $K_{f^*}$  – параметры, соответствующие коэффициентам регрессии и характеризующие математическое ожидание величин  $b_q$  и  $K_f$  по всему поперечному профилю и на левом, и на правом берегах реки 1. Уравнение (12) применимо при условии, что часть влаги, поступающей в неоген-четвертичные отложения, участвует преимущественно в формировании режима грунтовых вод (первый водоносный горизонт), а часть поступает в отложения палеогена и оказывает влияние на режим в основном только соответствующих подземных вод; коэффициент фильтрации K<sub>f1</sub> (13) представляет собой взвешенное по объемам водопритока значение для зоны активного водообмена в целом. Параметры модели (10)-(13) первоначально определяются для месяцев зимней межени (в случае рассматриваемой территории – с декабря по март [42]) методом наименьших квадратов с учетом условия (1), затем уточняются в результате подбора по критерию Kr<sub>3</sub> (14) и распространяются на весь год:

$$Kr_3 = 0,25Kr_1(q;4) + 0,75Kr_2(Inf;12),$$
 (14)

где  $Kr_1(q;4)$  – значение критерия  $Kr_1(2)$  при расчете удельного притока подземных вод по уравнению (7);  $Kr_2(Inf;12)$  – значение критерия  $Kr_2(3)$  при расчете инфильтрации по уравнению (9) с учетом умножения отношения  $\gamma$  на расчетный коэффициент фильтрации  $K_f$  и равенства готовых значений подземного стока и величины W в среднем за многолетний (однородный) период; взвешивающие коэффициенты получены как 4/(4+12)=0,25 и 1-0,25=0,75, где 4 – объем выборки для расчета  $Kr_1(q;4)$ , а 12 – для расчета  $Kr_2(Inf;12)$ .

Необходимо отметить, что по модели подземного стока (9)-(11) можно косвенно оценить общее поступление влаги в водоносные горизонты (по крайней мере, в пределах верхней части гидрогеологического разреза в диапазоне от поверхности до подошвы водоносных отложений палеогена) иначе, чем это предлагается в работах [6, 7, 12, 13, 15, 16, 42-45]. Предположим, что инфильтрация Inf определяется согласно Грину и Эмптону, а суммарный приток-отток подземных вод к расчетному профилю – по уравнению Дарси [3, 12, 13, 15, 43, 44]. Тогда выражение (8) для месяца t с учетом некоторых упрощений приобретает вид (15), а параметры hgr\* (среднее взвешенное значение глубины подземных вод) и  $H_{ef}$  (эффективное увлажнение, мм/мес) оцениваются по уравнениям (16)-(22):

$$W_{t} = k_{t}k_{w}\left(1 + \frac{H_{ef^{*},t}}{h_{gr^{*},t}}\right) + m_{f}\left(H_{r1,t} - H_{r2,t}\right)\frac{x}{L_{12}} + W_{0}, \quad (15)$$

$$h_{gr^{*,t}} = \beta_{N-Q} h_{grN-Q,t} + \beta_P h_{grP,t}, \qquad (16)$$

$$H_{ef,t} = P_{r,t} + h_{sm,t} - E_{op,t},$$
 (17)

$$h_{sm,t} = \begin{cases} a, & a > 0, \\ 0, & a \le 0, \end{cases}$$
(18)  
$$a = Sn_{t-1} - Sn_t,$$

$$Sn_{t} = \begin{cases} b, & b > 0, \\ 0, & b \le 0, \end{cases}$$
(19)

$$b = Sn_{t-1} + P_{sn,t} - E_{sn,t} - h_{snp,t},$$

$$h_{snp,t} = k_{sn} T_{a,t} N_{m,t}, \qquad (20)$$

$$E_{sn,t} = k_{Esn} d_{a,t} N_{m,t}, \qquad (21)$$

$$E_{op,t} = k_{Eop} \left( P_{r,t} - Y_{r_{1-01,t}} - E_{sn,t} \right) \frac{d_{a,t}}{\sum_{1}^{12} d_{a,t}},$$
 (22)

где Inf - средняя по профилю инфильтрация в водоносные горизонты, из которых подземные воды поступают в реку 1, мм/мес;  $k_t$  – коэффициент размерности; *m<sub>f</sub>* и *W*<sub>0</sub> – параметры зависимости притока-оттока подземных вод к расчетному профилю с учетом коэффициента водопроводимости и различий право- и левобережной частей относительно створа на реке 1; k<sub>w</sub> – среднее значение коэффициента влагопроводности по профилю; H<sub>r1</sub> и H<sub>r2</sub> среднемесячные уровни смежных рек 1 и 2 (в м БС) в створах, расположенных на расстоянии  $L_{12}$ ;  $h_{gr^*}$  – средневзвешенная глубина подземных вод (по глубинам в отложениях неоген-четвертичного и палеогенового возраста, м БС);  $\beta_Q$  и  $\beta_{Pg}$  – доля подземных вод из отложений неоген-четвертичного и палеогенового возраста в суммарном подземном стоке (6);  $P_r$  и  $P_{sn}$  – атмосферные осадки в жидком и твердом виде;  $E_{op}$  и  $E_{sn}$  – среднемесячное испарение с поверхностности водосбора в теплый и холодный периоды, мм/мес; Sn - влагозапасы в снежном покрове, мм;  $h_{snp}$  и  $h_{sm}$  – потенциальное снеготаяние и фактическая водоотдача из снежного покрова, мм/мес; *T<sub>a</sub>* (°С) и *d<sub>a</sub>* (гПа) – среднемесячные значения температуры и дефицита влажности атмосферного воздуха; *Y*<sub>r1-01</sub> – среднемесячный слой стока по профилю (разница слоев стока в створах 1 и 01), мм/мес; N<sub>m</sub> - количество суток в месяце t; k<sub>sn</sub> - коэффициент стаивания (начальное значение 5 мм/(°С·сут), принятое согласно [13], уточнялось подбором по критерию (3)), мм/(°С·сут); k<sub>sn</sub> - коэффициент пропорциональности, принятый равным 0,37 согласно [45]; k<sub>Еор</sub> – коэффициент пропорциональности, определяемый подбором для уравнения водного баланса про критерию (3).

Исходная гидрометеорологическая информация для модели (15)-(22) принята по данным Росгидромета и Томского политехнического университета, нормативным и нормативно-методическим документам Министерств природных ресурсов и экологии (включая Росгидромет) и строительства и хозяйства жилищно-коммунального России [46-49], а также опубликованным ранее работам [26, 27, 38, 39]. Для пунктов у сел Александровское, Напас и Средний Васюган были использованы данные непосредственно по соответствующим метеостанциям, а для прочих пунктов – как среднее взвешенное (23) по ближайшим метеостанциям по расчетному профилю: у п. Белый Яр – между метеостанциями г. Колпашево и п. Усть-Озерное; у с. Подгорное – между с. Бакчар и г. Колпашево:

$$\Phi_{x} = \frac{\frac{\Phi_{k}}{L_{k,x}} + \frac{\Phi_{k+1}}{L_{k+1,x}}}{\frac{1}{L_{k,x}} + \frac{1}{L_{k+1,x}}},$$
(23)

где  $\Phi$  – метеопараметр по данным метеостанций kи k+1 и в точке x между ними;  $L_{k,x}$  – расстояние между метеостанцией k и точкой x. Водный сток р. Оби у с. Александровское принят по данным р. Оби у с. Прохоркино с коэффициентом 1,046, сток р. Кети у п. Белый Яр – линейной интерполяцией между створами на р. Кети у п. Максимкин Яр и с. Родионово (по площади водосбора), а уровни воды р. Чаи ниже устья р. Иксы – по данным у с. Подгорное с учетом уклона реки.

# Результаты исследования и их обсуждение

Приведенная выше структура модели подземной составляющей стока является результатом апробации различных подходов с учетом следующих требований: 1) блоки математической модели должны максимально соответствовать действующему Российскому законодательству И нормативнометодической базе в области инженерных изысканий, в частности – требованиям [29, 47, 50-52], одновременно соответствуя подходам, закрепленным в международной практике [3, 6, 7, 53]; 2) используется минимальное количество гидрологических, гидрогеологических и климатических параметров, информация о которых приводится в изданиях подразделений Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации; 3) выполняются условие (1) и минимизация значений критериев (2), (3), (14). С учетом этого варианты расчетов (а) подземного стока в целом по водосбору (в замыкающем исследуемом створе), (б) подземного стока по поперечному профилю без учета притока-оттока к расчетному профилю, а также (в) инфильтрации и (г) испарения с поверхности водосборов способами, предложенными в [6, 7, 13, 15, 43-45, 53, 54], были отклонены вследствие более высоких значений критериев (2), (3), (14), неустойчивости результатов для разных объектов и необходимости привлечения большего количества параметров, включая определяемые методами оптимизации. В то же время необходимо отметить, что модель (4)–(13), (15)–(22) разработана и может применяться для условий таежной равнинной части бассейна Оби и в среднем за период 1995–2015 гг. в разрезе месяцев и года. Ее адаптация к другим природным условиям требует дополнительных исследований.

Собственно параметры полученной модели (4)–(13), (15)–(22) и значения критериев (2), (3), (14) приведены в табл. 2. Они в целом свидетельствуют о возможности практического использования модели для оценки ресурсов подземных вод зоны активного водообмена и условий их использования и охраны, например, на период эксплуатации водозаборов с вариативным заданием параметров (табл. 2).

Анализ результатов моделирования подтвердил ранее полученные выводы [26, 27, 38] о том, что, во-первых, нижняя граница подземной составляющей речного стока  $q_{1*}$  в месяц t (календарного года) в первом приближении (с учетом погрешности определения около 20 %, табл. 2, рис. 2, 3) может быть оценена по уравнению (24), существенно облегчающему расчеты стока и ресурсов подземных вод в пределах таежной зоны Западно-Сибирской равнины:

$$q_{1^{*,t}} = \begin{cases} Q_{r1,t}, & t = 1, 2, 3, 12; \\ Q_{r1,3} + (Q_{r1,12} - Q_{r1,3}) \frac{(t-3)}{(12-3)}, & 3 < t < 12, \end{cases}$$
(24)

где  $Q_{r1,t}$  – среднемесячный расход реки 1 в месяц t календарного года (3 – март; 12 – декабрь). Наибольшие отклонения значений подземного стока, вычисленного по уравнениям (4)–(13), по сравнению со способом (24), отмечены для р. Васюган. Этот факт, вероятно, объясняется конфигурацией водосбора реки, вследствие чего в створе с. Средний Васюган концентрируются подземные потоки, направленные как вдоль русла р. Васюган, так и вдоль его крупного притока – р. Нюрольки (рис. 1, a).

Во-вторых, в среднемноголетнем разрезе (1995–2015 гг.) преобладает подпорный режим взаимодействия речных и подземных вод. Наибольшая, но все же не определяющая, а подчиненная роль подпорного режима выявлена только для р. Чаи у с. Подгорное (рис. 2, *e*, табл. 2). Причем для этого же створа обнаружен существенный приток воды в палеогеновые отложения снизу или по профилю (рис. 4). Подобное явление, но существенно в меньших размерах, выявлено и для р. Оби у с. Александровское (рис. 2, *a*).

Параметр, единицы измерения		Пункт (у р	еки 1)/Point (ne	ear the river 1)	
(уравнение/пояснение)	с. Александровское	с. Напас	с. Белый Яр	с. Средний Васюган	с. Подгорное
Parameter, units (equation/explanation)	Aleksandrovskoe	Napas	Bely Yar	Sredny Vasyugan	Podgornoe
<i>K</i> <sub>f,Q*</sub> , м/c/m/s (10)	1,97·10 <sup>-3</sup>	2,45·10 <sup>-1</sup>	8,95·10 <sup>-5</sup>	7,24.10-4	8,25.10-6
$b_{Q^*}(10)$	7,49.10-4	1,10.10-4	4,15·10 <sup>-4</sup>	1,84.10-4	1,62.10-5
<i>Kr</i> <sub>3,Q</sub> (14)	0,26	0,25	0,32	0,13	0,31
<i>К<sub>f,P*</sub></i> , м/с/m/s (10)	1,26.10-3	3,10.10-5	1,31.10-5	2,19.10-4	-7,42·10 <sup>-5</sup>
$b_{p*}(10)$	5,75·10 <sup>-4</sup>	3,65.10-4	6,60·10 <sup>-5</sup>	6,62·10 <sup>-4</sup>	-7,92·10 <sup>-4</sup>
$Kr_{3,P}(14)$	0,14	0,21	0,24	0,03	8,03
<i>K</i> <sub>f1</sub> , м/с/m/s (13)	1,60.10-3	7,39·10 <sup>-5</sup>	4,95·10 <sup>-5</sup>	1,55.10-4	-6,69·10 <sup>-5</sup>
$\beta_{\rm Q}$ (6)	0,60	0,60	0,85	0,21	0,11
<i>β</i> <sub>₽</sub> (6)	0,40	0,40	0,15	0,79	0,89
<i>K</i> <sub>w1</sub> ·10 <sup>9</sup> , м/с/m/s (15)	1,584	1,851	1,504	1,818	-2,912
$m_{f}$ , 1/c/1/s (15)	-35,597	11,216	6,628	34,664	-16,722
W <sub>0</sub> , м/с/m/s (15)	2,812	4,822	2,434	6,289	-28,972
<i>T<sub>a(a)</sub></i> , °C (20)	-1,3	-1,5	-0,4	-0,2	0,2
<i>P</i> <sub>r</sub> , мм/год/mm/year (22)	324,7	366,9	385,0	407,3	384,5
<i>P<sub>sm</sub></i> , мм/год/mm/year (19)	208,7	266,9	157,1	155,5	134,1
<i>h<sub>sm</sub></i> , мм/год/mm/year (18)	148,9	205,5	126,0	123,1	100,7
<i>E<sub>sn</sub></i> , мм/год/mm/year (21)	59,8	61,4	31,1	32,4	33,5
<i>E</i> <sub>op</sub> , мм/год/mm/year (22)	222,0	300,4	361,1	319,1	367,0
Y <sub>r1-01</sub> , мм/год/mm/year (22)	251,6	272,1	149,9	211,2	118,2
Ygr (подземная составляющая годового					
речного стока Y <sub>r1-01</sub> /underground component	146,1	116,6	73,3	149,8	53,3
of annual river flow Y <sub>r1-01</sub> ), мм/год/mm/year					
Ygr, %	58,1	42,9	48,9	70,9	45,1
Sr, у (средняя годовая минерализация реч-					
ных вод/total dissolved of substancies of	154,4	60,9	102,9	154,6	377,1
annual river flow), мг/дм <sup>3</sup> /mg/dm <sup>3</sup>					
$\delta_{Sr,y}$ (погрешность определения $S_{r,y}$ /	84	51	7.0	10.1	35.2
error of determination), мг/дм <sup>3</sup> /mg/dm <sup>3</sup>	0,1	5,1	7,0	10,1	55,2
<i>S<sub>r,w</sub></i> , мг/дм <sup>3</sup> (5)	252,1	144,0	210,7	367,8	588,2
<i>δ</i> sr,w, мг/дм³/mg/dm³	20,3	11,0	4,9	14,1	51,7
<i>S<sub>r,Q</sub>,</i> мг/дм <sup>3</sup> /mg/dm <sup>3</sup> (5)	183,2	69,5	137,4	158,5	357,2
<i>δ</i> <sub>Sr,Q</sub> , мг/дм <sup>3</sup> /mg/dm <sup>3</sup>	20,2	28,4	5,1	60,4	11,7
<i>S<sub>r,₽</sub>,</i> мг/дм <sup>3</sup> /mg/dm <sup>3</sup> (5)	356,9	257,3	619,3	424,0	618,1
<i>δsr,</i> ₽, мг/дм³/mg/dm³	10,6	7,6	72,9	23,1	29,5

**Таблица 2.** Параметры модели подземной составляющей речного стока и критерии качества расчетов **Table 2.** Parameters of the model of the underground component of river flow and criteria for the quality of calculations

Примечание: погрешность определения среднего арифметического А:  $\delta_A \approx \frac{\sigma}{\sqrt{N}} \sigma$  – среднее квадратическое отклонение;

N – объем выборки; отрицательное значение коэффициента фильтрации свидетельствует о перетоке в другой водосбор. Note: error in determining the arithmetic mean A:  $\delta_A \approx \frac{\sigma}{\sqrt{N}} \sigma$  is standard deviation; N is the sample size; negative value of the filtration coefficient indicates a flow into another catchment area.

В-третьих, уточненные оценки (табл. 2) в целом совпадают с ранее полученными результатами [26] с учетом использования гидрохимических материалов исследований, выполненных после 2010 г., и привлечения дополнительных материалов по подземным водам в нижнем течении рек Кети и Чаи (по данным у г. Колпашево), Тым (по данным для приобской территории водосбора и на водоразделе с р. Вах) и Васюган (на участке от устья р. Нюрольки до с. Каргасок). Наиболее существенные отклонения отмечены для р. Кети, что, видимо, связано со смещением исследуемого створа от участка среднего течения (п. Максимкин Яр) к нижнему (п. Белый Яр) и, соответственно, изменением условий дренирования водоносных отложений, не исключая, безусловно, и значительной погрешности используемых оценок водного стока и содержания растворенных веществ как в речных, так и в подземных водах.

Полученные данные в целом свидетельствуют о значительной роли поверхностного стока в формировании общего речного стока и подземного стока в зоне активного водообмена (преобладание нисходящего режима для речных долин), что определяет необходимость более иного подхода к определению границ водоохранных зон для поверхностных водных объектов и санитарных защитных зон для поверхностных и подземных водозаборов.

Кроме того, очевидно, что на большей части рассматриваемой территории подземная составляющая речного стока средних рек (по [51]) и, соответственно, подземный сток в зоне активного водообмена ограничены отложениями кайнозоя, но на южных участках, в частности – в водосборе р. Чаи, возможен приток подземных вод из меловых отложений.







Fig. 2. Changes in the underground component of river runoff of the studied rivers: a) Ob river at Aleksandrovskoe village;
b) Tym river at Napas village; c) Ket river at Bely Yar village; d) Vasyugan river at Sredny Vasyugan village; e) Chaya river at Podgornoe village; specific water consumption: A – from Neogene-Quaternary deposits; B – from Paleogene deposits; C – groundwater from Neogene-Quaternary and Paleogene deposits; D – total river runoff; dQ is the specific water consumption



**Рис. 3.** Зависимость между результатами расчета подземного стока q(m) по модели (10), (11) и линейной интерполяцией q(li) по уравнению (24); R<sup>2</sup> – квадрат корреляционного отношения при расчете q(m) по q(li)

**Fig. 3.** Relationship between the results of calculating the underground flow q(m) using model (10), (11) and the linear interpolation q(li) using equation (24);  $R^2$  is the square of the correlation ratio when calculating q(m) using q(li)

При этом отметим, что примерно на этой же территории наблюдается заметное изменение мощности отложений мела и палеогена и, особенно, уклонов их залегания (рис. 1, b). В частности, на участке длиной 117 км уклон подошвы отложений палеогена составляет ориентировочно 0,93 м/км, а неоген-четвертичных отложений – 0,32 м/км. При этом отмечается понижение отметок подошвы палеогеновых отложений на 108 м, а их суммарная мощность увеличивается примерно на 70 м, что, возможно, обусловливает сначала некоторое увеличение скоростей движения подземных вод в верхнем течении левых притоков р. Оби (притоки рр. Чаи и Парабель), а затем их снижение в среднем течении. Соответственно меняется и транспортирующая способность регионального подземного стока (уменьшается), и время взаимодействия вод с горными породами (увеличивается). Предположим, что выполняются следующие условия:

- воды из отложений докайнозойских отложений поступают в палеогеновый водоносный горизонт в пределах верхнего и среднего участков водосбора р. Чаи в интервале глубин –76... –176 м БС (на рис. 1, b: L=554 км, H(<KZ)= –72 м БС; L=671 км, H(<KZ)= –180 м БС; по 4 м сверху и снизу на ограничения на переходные условия по фильтрационным свойствам), то есть по слою мощностью 100 м;
- напор составляет 0,63 м/км (среднее из уклонов 0,32 и 0,93 м/км), коэффициент фильтрации принят в размере 7,42·10<sup>-5</sup> м/с≈4 м/сут (то есть фильтрационные свойства, характерные (ориентировочно в среднем) для глинистых песков и супеси с активной пористостью около 0,4 [5, 15, 44];
- 3) среднее содержание общего железа в подземных водах лесостепи в бассейне Верхней Оби в докайнозойских образованиях (5,43±4,97 мг/дм<sup>3</sup>) выше, чем в палеогеновых (1,28±0,42 мг/дм<sup>3</sup>) и неоген-четвертичных (2,45±1,05 мг/дм<sup>3</sup>) отложениях на этой же территории, но несколько ниже, чем в отложениях палеогена (6,18±0,58 мг/дм<sup>3</sup>), и больше, чем в неогенчетвертичных отложениях (2,55±0,32 мг/дм<sup>3</sup>) в левобережной части бассейна Средней Оби в подзоне южной тайги [38].

В то же время наблюдается существенное снижение относительного содержания соединений Fe<sup>2+</sup> в водах по мере увеличения интенсивности водообмена и содержания растворенного кислорода при примерно сопоставимых значениях окисляемости [26, 27, 35, 38, 55–57]. Например, в водах верхнемелового водоносного комплекса у с. Мельниково (примерно на широте верховий притоков р. Чаи) отмечено среднее содержание общего железа в размере 6,8 мг/дм<sup>3</sup> при доле Fe<sup>2+</sup> (в среднем) около 73 % [58] при том, что в поверхностных водах последняя величина стремится к нулю, а основное снижение происходит в пределах первого водоносного комплекса, в частности в пределах Обь-Томского междуречья отношение Fe<sup>2+</sup>/Fe<sub>общ</sub> снижается с 0,77 в водах верхнемелового комплекса до 0,64 в неоген-четвертичных отложениях [26, 27, 59];

Таким образом, в первом приближении содержание Fe<sup>2+</sup> уменьшается с 4,18 мг/дм<sup>3</sup> (5,43 мг/дм<sup>3</sup>·0,77) в докайнозойских образованиях в бассейне Верхней Оби до 1,63 мг/дм<sup>3</sup> (2,55 мг/дм<sup>3</sup>·0,64) в неогенчетвертичных отложениях южной тайги в левобережье Оби, то есть общее снижение концентраций – 2,55 мг/дм<sup>3</sup>.

Тогда с учетом указанных выше допущений среднемноголетний расход подземных вод в слое мощностью 100 м и шириной 1000 м по поперечному сечению водосбора р. Чаи в ее среднем течении ориентировочно оценивается в размере 1,86  $\text{m}^3$ /с (4,65·10<sup>-5</sup> м/с×100 м×1000 м×0,4), или 0,06 км<sup>3</sup>/год, а максимально возможное снижение выноса Fe<sup>2+</sup> (при снижении концентраций на 2,55 мг/дм<sup>3</sup>) – около 150 т/год. Безусловно, это максимально высокая оценка, превышающая фактическое уменьшение выноса соединений Fe<sup>2+</sup>. Тем не менее можно предположить, что хотя бы малая часть этой величины может способствовать накоплению соединений железа в отложениях палеогена в бассейне Средней Оби.



**Рис. 4.** Внутригодовое изменение величины W<sub>1</sub> (12) по расчетным профилям в целом для кайнозойских отложений (рис. 2, а-е; условные обозначения к рис. 2) в целом для зоны активного водообмена (а) и отдельно для неогенчетвертичных и палеогеновых отложений в створе р. Чаи у с. Подгорное (b); поступление воды: А – в отложения неоген-четвертичного возраста; В – отложения палеогенового возраста

Fig. 4. Intra-annual changes in W1 value (12) along the calculated profiles as a whole for Cenozoic deposits (Fig. 2, a–e; legend to Fig. 2) as a whole for the zone of active water exchange (a) and separately for Neogene-Quaternary and Paleogene deposits in the section of the Chaya river at Podgornoe (b); water inflow into: A – Neogene-Quaternary deposits; B – Paleogene deposits

С учетом высокой заболоченности как в настоящее время, так в рамках палеогена [26, 60-62], это позволяет утверждать вслед за авторами [35], что формирование железорудных узлов на юге Западно-Сибирской равнины как минимум связано не только (и, скорее всего, не столько) с подъемом флюидов, стоком с палеозойского обрамления и процессами осаждения в прибрежной зоне палеоморя в мезозое и палеогене [63, 64]. Причем накопление соединений железа в отложениях палеогена и, возможно, верхнего мела связано не только с их выносом из водовмещающих отложений и перераспределением в пространстве, но и с выпадением малорастворимых соединений на участках относительно резкого изменения величины и конфигурации подземных потоков на стыке лесостепной и таежной зон.

#### Заключение

Разработана методика оценки подземной составляющей речного стока в пределах Западно-Сибирской равнины по данным о среднемесячных (в среднем за многолетний период) расходах и уровнях речных вод в зимнюю межень и уровнях подземных вод в зоне активного водообмена. Методика максимально адаптирована к требованиям действующего Российского законодательства и характеру информации, получаемой в системе государственного мониторинга поверхностных и подземных вод (на территории Российской Федерации), включает в себя анализ гидрогеохимического баланса и определение методами математической статистики и оптимизации параметров, соответствующих среднему по поперечному профилю коэффициенту фильтрации и удельному притоку подземных вод с учетом гидрогеологических различий на лево- и правобережной частях профиля.

Методика апробирована на примере Оби и крупных притоков на участке ее среднего течения. Показано, что в большинстве случаев средние и большие реки рассматриваемой территории характеризуются преобладанием нисходящего режима взаимодействия речных и подземных вод в пределах речных долин, а нижний предел определения подземной составляющей речного стока может быть определен с использованием линейной интерполяции между значениями стока в марте и декабре по уравнению (24). Вместе с тем для более точной оценки подземного стока целесообразны поддержание и расширение существующей системы наблюдений на режимных гидрогеологических скважинах, вскрывающих первый и прочие водоносные горизонты, особенно - в водосборах рек сложной конфигурации (например, р. Васюган).

Анализ полученных результатов также показал, что гидрогеологические условия, точнее – их изменения на границе лесостепной и таежной зон, могли ранее (в верхнем меле и палеогене) и могут в настоящее время способствовать аккумуляции соединений железа. Для уточнения этого предположения целесообразно проведение комплекса гидрогеологических и геохимических исследований.

# СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Куделин Б.И. Принципы региональной оценки естественных ресурсов подземных вод. М.: Изд-во МГУ, 1960. 343 с.
- 2. Биндеман Н.Н., Язвин Л.С. Оценка эксплуатационных запасов подземных вод. 2-е издание. М.: Недра, 1970 216 с.
- 3. Loucks D.P., Van Beek E. Water resources systems planning and management. An introduction to methods, models and applications. Turin: UNESCO Publ., printed by Ages Arti Grafiche, 2005. 679 p.
- 4. Подземные воды мира. Ресурсы, использование, прогнозы / под ред. И.С. Зекцера. М.: Наука, 2007. 438 с.
- 5. Weight W.D. Hydrogeology field manual. 2<sup>nd</sup> ed. USA: The McGraw-Hill Companies, Inc., 2008. 751 p.
- 6. Manual on stream gauging. Vol. I. Fieldwork. WMO. No. 1044. Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization, 2010. 252 p.
- Manual on Stream Gauging. Vol. II. Computation of Discharge. WMO. No. 1044. Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization, 2010. – 198 p.
- 8. Боревский Б.В., Марков М.Л. Является ли меженный расход рек мерой питания подземных вод или общего подземного стока? // Разведка и охрана недр. 2014. № 5. С. 10–16.
- 9. Danilov-Danilyan V.I., Klyuev N.N., Kotlyakov V.M. Russia in the global natural and ecological space // Regional Research of Russia. 2023. Vol. 13. № 1. P. 34–57. DOI: 10.1134/S2079970522700472.
- 10. Zanini A., Celico F. Advances in aquifer systems analysis: flows, interactions, quality status, and remediation // Water. 2025. № 17. P. 421. DOI: 10.3390/w17030421.
- 11. A Comprehensive Review of Riverbank Filtration Technology for Water Treatment / Y. Gao, Y. Tang, M. Zhao, X. Zheng, H. Jin // Water 2025. 2025. № 17. P. 371. DOI: 10.3390/w17030371.
- 12. Introduction to hydrology. 2<sup>nd</sup> ed. / Ed. by Jr. W. Viessman, J.W. Knapp, G.L. Lewis, T.E. Harbaugh. New York, USA: Intext educational Publishers, 1977. 704 p.
- 13. Руководство по гидрологическим прогнозам. Вып. 1. Долгосрочные прогнозы элементов водного режима рек и водохранилищ. Л.: Гидрометеоиздат, 1989. 357 с.
- 14. Kalbus E., Reinstorf F., Schirmer M. Measuring methods for groundwater surface water interactions: a review // Hydrology and Earth System Sciences. 2006. № 10. P. 873–887.
- 15. Hendriks M.R. Introduction to physical hydrology. Oxford, New York: Oxford University Press, UK, 2010. 331 p.
- 16. Grinevskii S.O., Pozdnyakov S.P. Principles of regional estimation of infiltration groundwater recharge based on geohydrological models // Water Resources. 2010. Vol. 37. № 5. P. 638–652. DOI: 10.1134/S0097807810050040.

- 17. Guidance on environmental flows. Integrating e-flow science with fluvial geomorphology to maintain ecosystem services. No. 2. Vol. III. Hydrology. WMO-No. 1235. Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization (WMO), 2019. 41 p.
- Савичев О.Г. Гидроэкологическое обоснование водохозяйственных решений. Томск: Изд-во Томск. политехн. ун-та, 2021. – 167 с.
- Algorithm grwat for automated hydrograph separation by B.I. Kudelin's method: problems and perspectives / E.P. Rets, M.B. Kireeva, T.E. Samsonov, A.V. Gorbarenko, N.L. Frolova, N.N. Ezerova // Water Resources. – 2022. – Vol. 49. – № 1. – P. 23–37. DOI: 10.1134/S0097807822010146.
- 20. Christenson C., Cardiff M. Where has hydrogeologic science been, and where is it going? Research trends in hydrogeology publishing over the past 60 years // Hydrogeology journal. 2024. Vol. 32. P. 1787–1800. DOI: 10.1007/s10040-024-02829-4.
- 21. Chemical indication of the processes of freshet runoff formation in a small experimental catchment in the Prilenskoe plato, the Republic of Sakha (Yakutia) / V.V. Shamov, T.N. Lutsenko, L.S. Lebedeva, A.M. Tarbeeva, V.S. Efremov, N.A. Pavlova, M.I. Ksenofontova // Water resources. 2023. Vol. 50. № 3. P. 379–391. DOI: 10.1134/s0097807823030120.
- 22. Лукин А.А. Морфоструктурно-гидрогеологический анализ. Томск: Изд-во Томск. политехн. ун-та, 1995. 48 с.
- 23. Викторов А.С., Капралова В.Н., Орлов Т.В. Анализ развития экзогенных геологических процессов на основе моделей математической морфологии ландшафта // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2023. № 6. С. 16–25. DOI: 10.31857/s0869780923060085.
- 24. Groundwater discharge contribution to dissolved inorganic carbon and riverine carbon emissions in a subarctic region / A. Biehler, B. Baudron, Th. Buffin-Bélanger, G. Chaillou // Biogeochemistry. 2023. № 165. P. 129–150. DOI: 10.1007/s10533-023-01060-9.
- 25. Гриневский С.О., Преображенская А.Е., Цяпа Л.П. Идентификация гидрогеодинамических условий потока подземных вод по опытным данным // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. 2009. № 3. С. 39–44.
- 26. Савичев О.Г. Водные ресурсы Томской области. Томск: Изд-во Томск. политехн. ун-та, 2010. 248 с.
- 27. Savichev O., Moiseeva J., Guseva N. Changes in the groundwater levels and regimes in the taiga zone of Western Siberia as a result of global warming // Theoretical and Applied Climatology. 2022. Vol. 147. № 3–4. P. 1121–1131. DOI: 10.1007/s00704-021-03879-4.
- 28. Шестаков В.М. Гидрогеодинамика. М.: Изд-во КДУ, 2009. 334 с.
- 29. ГОСТ Р 59054-2020. Охрана окружающей среды. Поверхностные и подземные воды. Классификация водных объектов. Environmental protection. Surface and underground water. Classification of water bodies. – М.: Стандартинформ, 2020. – 21 с.
- Гидрогеология СССР. Т. 16. Западно-Сибирская равнина (Тюменская, Омская, Новосибирская и Томская области). М.: Недра, 1970. – 368 с.
- 31. Гидрогеология СССР. Т. 17. Кемеровская область и Алтайский край. М.: Недра, 1972. 398 с.
- 32. Создание электронной версии карты четвертичных отложений Томской области масштаба 1:500000 / Ю.В. Макушин, Н.Г. Глущенко, Н.И. Глущенко, Е.К. Панаева // Геоинформатика-2000: Труды Международн. научно-практ. конф. – Томск, 12–14.09.2000. – Томск: Томск. гос. ун-т, 2000. – С. 142–144.
- 33. Shvartsev S.L. Geochemistry of fresh Groundwater in the Main Landscape Zones of the Earth // Geochemistry International. 2008. – Vol. 46. – № 13. – P. 1285–1398.
- 34. Cretaceous paleogeography of the West Siberian sedimentary basin / A.E. Kontorovich, S.V. Ershov, V.A. Kazanenkov, Yu.N. Karogodin, V.A. Kontorovich, N.K. Lebedeva, B.L. Nikitenko, N.I. Popova, B.N. Shurygin // Geology and geophysics. – 2014. – Vol. 55. – № 5–6. – P. 745–776.
- 35. Геологическая эволюция и самоорганизация системы вода порода: в 5 т. Т. 2. Система вода-порода в условиях зоны гипергенеза / С.Л. Шварцев, Б.Н. Рыженко, В.А. Алексеев, Е.М. Дутова, И.А. Кондратьева, Ю.Г. Копылова, О.Е. Лепокурова / отв. ред. Б.Н. Рыженко. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2007. 389 с.
- 36. Палеотемпературное моделирование очагов генерации углеводородов и их роль в формировании залежей «палеозойской» нефти (Останинское месторождение, Томская область) / В.И. Исаев, М.Ф. Галиева, А.О. Алеева, Г.А. Лобова, В.И. Старостенко, А.Н. Фомин // Георесурсы. 2021. Т. 23. № 1. С. 2–16. DOI: 10.18599/grs.2021.1.1.
- 37. Состояние геологической среды (недр) территории Сибирского федерального округа в 2022 г. Информационный бюллетень, выпуск 19. Томск: Филиал «Сибирский региональный центр ГМСН», 2023. 242 с.
- 38. Zemtsov V., Savichev O., Petrova V. The mechanism and regularities of ion runoff formation in the Ob River (Western Siberia) under the Influence of its tributaries and underground feeding // Water. 2023. Vol. 15. P. 2413. DOI: 10.3390/w15132413.
- 39. Савичев О.Г. Изменения условий взаимодействия подземных, речных и болотных вод при заболачивании Западно-Сибирской равнины в голоцене // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 2. – С. 170–186. DOI: 10.18799/24131830/2024/2/4535.
- СП 529.1325800.2023. Определение основных расчетных гидрологических характеристик. М.: Минстрой РФ, 2023. 152 с.
- 41. Nash J.E., Sutcliffe J.V. River flow forecasting through conceptual models. P. I. A discussion of principles // Journal of Hydrology. 1970. № 10 (3). P. 282–290.
- Методические рекомендации по определению расчетных гидрологических характеристик при отсутствии данных гидрометрических наблюдений / под ред. А.В. Рождественского, А.Г. Лобановой. – СПб: Нестор-История, 2009. – 193 с.
- 43. Гельфан А.Н. Динамико-стохастическое моделирование формирования талого стока. М.: Наука, 2007. 279 с.
- Гусев Е.М., Насонова О.Н. Моделирование тепло- и массообмена поверхности суши с атмосферой. М.: Наука, 2010. 327 с.
- 45. Рекомендации по расчету испарения с поверхности суши / под ред. П.П. Кузьмина, С.М. Алпатьева. Л.: Гидрометеоиздат, 1976. 114 с.
- 46. Основные гидрологические характеристики. Т. 15. Алтай, Западная Сибирь и Северный Казахстан. Вып. 1. Верхняя и Средняя Обь. Л.: Гидрометеоиздат, 1979. 488 с.
- 47. СП 131.13330.2020. Строительная климатология. М.: Стандартинформ, 2021. 228 с.

- Водный кадастр. Ресурсы поверхностных и подземных вод, их использование и качество. Ежегодное издание. 2022 год. – СПб: Росгидромет, 2023. – 153 с.
- 49. О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2022 году. Государственный доклад. М.: Минприроды России; МГУ им. М.В. Ломоносова, 2023. 686 с.
- 50. Водный кодекс Российской Федерации (с изменениями на 4 августа 2023 года). Кодекс РФ от 03.06.2006 N 74-ФЗ. М.: Кремль, 2023. 52 с.
- 51. ГОСТ 19179-73. Гидрология суши. Термины и определения. М.: Госстандарт СССР, 1988. 47 с.
- 52. СП 47.13330.2016 Инженерные изыскания для строительства. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 11-02-96 (с Изменением N 1). Engineering survey for construction. Basic principles. М.: Минстрой РФ, 2016. 111 с.
- 53. Technical Regulations. Basic Documents No. 2. Vol. III Hydrology. 2021 ed. WMO-No. 49. Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization (WMO), 2021. 21 p.
- 54. СТО ГГИ 52.08.37-2015. Влагозапасы и промерзание почв, испарение с почвы и водной поверхности при региональном изменении климата. Рекомендации по расчету и прогнозу средних многолетних изменений. – СПб: ART-XPRESS, 2015. – 40 с.
- 55. Water-rock-organic matter interactions in wetland ecosystem: hydrogeochemical investigation and computer modeling / O. Shvartseva, O. Gaskova, A. Yurtaev, A. Boguslavsky, M. Kolpakova, D. Mashkova // Water. - 2024. - Vol. 16. - P. 428. DOI: 10.3390/w16030428.
- 56. Dissolved iron and organic matter in Boreal rivers across a South–North transect / A. Aleshina, M.A. Rusakova, O.Y. Drozdova, O.S. Pokrovsky, S.A. Lapitskiy // Environments. 2024. Vol. 11. P. 65. DOI: 10.3390/environments11040065.
- 57. Macro- and micronutrient release from ash and litter in permafrost-affected forest / D. Kuzmina, S.V. Loiko, A.G. Lim, G.I. Istigechev, S.P. Kulizhsky, F. Julien, J.L. Rols, O.S. Pokrovsky // Geoderma. 2024. Vol. 447. P. 116925. DOI: 10.1016/j.geoderma.2024.116925.
- 58. Горохова И.В., Зятева О.Ф. Геохимия минеральных вод верхнемеловых отложений в с. Мельниково Томской области // Обской вестник. 2001. № 1. С. 110–113.
- 59. Колоколова О.В. Геохимия подземных вод района Томского водозабора: автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. Томск, 2003. 21 с.
- 60. Болотные системы Западной Сибири и их природоохранное значение / О.Л. Лисс, Л.И. Абрамова, Н.А. Аветов, Н.А. Березина, Л.И. Инишева, Т.В. Курнишкова, З.А. Слука, Т.Ю. Толпышева, Н.К. Шведчикова / под ред. В.Б. Куваева. Тула: Гриф и К°, 2001. 584 с.
- Eurasian mires of the Southern Taiga Belt: modern features and response to Holocene palaeoclimate / T. Minayeva, W. Bleuten, A. Sirin, E.D. Lapshina // Wetlands and Natural Resource Management. Ecological Studies / Eds. J.T.A. Verhoeven, B. Beltman, R. Bobbink, D.F. Whigham. – Berlin: Heidelberg: Springer-Verlag, 2006. – Vol. 190 – P. 315–341.
- 62. Global wetlands: potential distribution, wetland loss, and status / S. Hu, Zh. Niu, Y. Chen, L. Li, H. Zhang // Science of the Total Environment. 2017. Vol. 586. P. 319–327. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.02.001.
- 63. Origin of ooids, peloids and micro-oncoids of marine ironstone deposits in Western Siberia (Russia) / M. Rudmin, S. Banerjee, P. Maximov, A. Novoselov, Y. Trubin, P. Smirnov, A. Abersteiner, D. Tang, A. Mazurov // Journal of Asian Earth Sciences. – 2022. – Vol. 237. – P. 105361. DOI: 10.1016/J.JSEAES.2022.105361.
- 64. Западно-Сибирский железорудный пояс: проблемы и перспективы / В.А. Домаренко, А.Я. Пшеничкин, В.П. Дмитриенко, Е.В. Перегудина, Б.К. Кенесбаев. Томск: ООО «СТТ», 2024. 180 с.

# Информация об авторах

**Олег Геннадьевич Савичев**, доктор географических наук, профессор отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. osavichev@mail.ru; https://orcid.org/0000-0002-9561-953X

Поступила в редакцию: 07.03.2025 Поступила после рецензирования: 02.04.2025 Принята к публикации: 10.04.2025

#### REFERENCES

- 1. Kudelin B.I. *Principles of regional assessment of natural groundwater resources*. Moscow, Moscow State University Publ., 1960. 343 p. (In Russ.)
- Bindeman N.N., Yazvin L.S. Assessment of exploitable reserves of groundwater. 2<sup>nd</sup> ed. Moscow, Nedra Publ., 1970. 216 p. (In Russ.)
- 3. Loucks D.P., Van Beek E. *Water resources systems planning and management. An introduction to methods, models and applications*. Turin, UNESCO Publ., printed by Ages Arti Grafiche, 2005. 679 p.
- 4. Groundwater of the world. Resources, use, prognoses. Ed. by I.S. Zektser. Moscow, Nauka Publ., 2007. 438 p. (In Russ.)
- 5. Weight W.D. *Hydrogeology field manual*. 2<sup>nd</sup> ed. USA, The McGraw-Hill Companies, Inc., 2008. 751 p.
- 6. *Manual on stream gauging*. Vol. I. *Fieldwork*. WMO. No. 1044. Geneva, Switzerland, World Meteorological Organization, 2010. 252 p.
- 7. *Manual on Stream Gauging*. Vol. II. *Computation of Discharge*. WMO-No. 1044. Geneva, Switzerland, World Meteorological Organization, 2010. 198 p.
- 8. Borevskiy B.V., Markov M.L. Is the low-water discharge of rivers a measure of groundwater recharge or total underground flow? *Exploration and protection of mineral resources*, 2014, no. 5, pp. 10–16. (In Russ.)

- Danilov-Danilyan V.I., Klyuev N.N., Kotlyakov V.M. Russia in the global natural and ecological space. *Regional Research of Russia*, 2023, vol. 13, no. 1, pp. 34–57. DOI: 10.1134/S2079970522700472.
- 10. Zanini A., Celico F. Advances in aquifer systems analysis: flows, interactions, quality status, and remediation. *Water*, 2025, vol. 17, pp. 421. DOI: 10.3390/w17030421.
- 11. Gao Y., Tang Y., Zhao M., Zheng X., Jin H. A comprehensive review of riverbank filtration technology for water treatment. *Water*, 2025, vol. 17, pp. 371. DOI: 10.3390/w17030371.
- 12. *Introduction to hydrology*. 2<sup>nd</sup> ed. Eds. Jr. W. Viessman, J.W. Knapp, G.L. Lewis, T.E. Harbaugh. New York, Intext educational Pub., 1977. 704 p.
- 13. Guide to hydrological forecasts. Iss. 1. Long-term forecasts of the elements of the water regime of rivers and reservoirs. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1989. 357 p. (In Russ.)
- 14. Kalbus E., Reinstorf F., Schirmer M. Measuring methods for groundwater surface water interactions: a review. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2006, vol. 10, pp. 873–887.
- 15. Hendriks M.R. Introduction to physical hydrology. Oxford; New York, Oxford University Press, 2010. 331 p.
- 16. Grinevskii S.O., Pozdnyakov S.P. Principles of regional estimation of infiltration groundwater recharge based on geohydrological models. *Water Resources*, 2010, vol. 37, no. 5, p. 638–652. DOI: 10.1134/S0097807810050040.
- 17. Guidance on environmental flows. Integrating e-flow science with fluvial Geomorphology to maintain ecosystem services. No. 2. Vol. III. Hydrology, WMO-No. 1235. Geneva, Switzerland, World Meteorological Organization (WMO), 2019. 41 p.
- 18. Savichev O.G. *Hydroecological substantiation of water management decisions*. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ. House, 2021. 167 p. (In Russ.)
- Rets E.P., Kireeva M.B., Samsonov T.E., Gorbarenko A.V., Frolova N.L., Ezerova N.N. Algorithm grwat for automated hydrograph separation by b.i. kudelin's method: problems and perspectives. *Water Resources*, 2022, vol. 49, no. 1, pp. 23–37. DOI: 10.1134/S0097807822010146.
- 20. Christenson C., Cardiff M. Where has hydrogeologic science been, and where is it going? Research trends in hydrogeology publishing over the past 60 years. *Hydrogeology journal*, 2024, vol. 32, p. 1787–1800. DOI: 10.1007/s10040-024-02829-4.
- Shamov V.V., Lutsenko T.N., Lebedeva L.S., Tarbeeva A.M., Efremov V.S., Pavlova N.A., Ksenofontova M.I. Chemical indication of the processes of freshet runoff formation in a small experimental catchment in the Prilenskoe plato, the Republic of Sakha (Yakutia). *Water resources*, 2023, vol. 50, no. 3, p. 379–391. DOI: 10.1134/s0097807823030120.
- 22. Lukin A.A. Morphostructural-hydrogeological analysis. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ. house, 1995. 48 p. (In Russ.)
- Viktorov A.S., Kapralova V.N., Orlov T.V. Analysis of the exogenous geological process development based on the models of the mathematical morphology of landscapes. *Geoecology. Engineering geology, hydrogeology, geocryology*, 2023, no. 6, pp. 16–25. (In Russ.) DOI: 10.31857/s0869780923060085.
- 24. Biehler A., Baudron B., Buffin-Bélanger Th., Chaillou G. Groundwater discharge contribution to dissolved inorganic carbon and riverine carbon emissions in a subarctic region. *Biogeochemistry*, 2023, vol. 165, pp. 129–150. DOI: 10.1007/s10533-023-01060-9.
- 25. Grinevskiy C.O., Preobrazhenskaya A.E., Tsyapa L.P. Identification of hydrogeodynamic conditions of groundwater flow based on experimental data. *News of higher educational institutions. Geology and exploration*, 2009, no. 3, p. 39–44. (In Russ.)
- 26. Savichev O.G. Water resources of the Tomsk region. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ. house, 2010. 248 p. (In Russ.)
- Savichev O., Moiseeva J., Guseva N. Changes in the groundwater levels and regimes in the taiga zone of Western Siberia as a result of global warming. *Theoretical and Applied Climatology*, 2022, vol. 147 (3–4), pp. 1121–1131. DOI: 10.1007/s00704-021-03879-4.
- 28. Shestakov V.M. Hydrogeodynamics. Moscow, KDU Publ., 2009. 334 p. (In Russ.)
- 29. SS R 59054-2020. Environmental protection. Surface and underground water. Classification of water bodies. Moscow, Gosstandart of the USSR Publ., 2020. 21 p. (In Russ.)
- 30. Hydrogeology of the USSR. Vol. 16. The West Siberian Plain (Tyumen, Omsk, Novosibirsk and Tomsk regions). Moscow, Nedra Publ., 1970. 368 p. (In Russ.)
- 31. Hydrogeology of the USSR. Vol. 17. Kemerovo and Altai regions. Moscow, Nedra Publ., 1972. 398 p. (In Russ.)
- 32. Makushin Yu.V., Glushchenko N.G., Glushchenko N.I., Panaeva E.K. Creation of an electronic version of the map of Quaternary deposits of the Tomsk region at a scale of 1:500000. *Geoinformatics-2000. Proc. of the International scientific and practical conference*. Tomsk, September 12–14, 2000. Tomsk, Tomsk state university Publ., 2000. pp. 142–144. (In Russ.)
- 33. Shvartsev S.L. Geochemistry of fresh groundwater in the main landscape zones of the Earth. *Geochemistry International*, 2008, vol. 46, no. 13, pp. 1285–1398.
- 34. Kontorovich A.E., Ershov S.V., Kazanenkov V.A., Karogodin Yu.N., Kontorovich V.A., Lebedeva N.K., Nikitenko B.L., Popova N.I., and Shurygin B.N. Cretaceous paleogeography of the West Siberian sedimentary basin. *Geology and geophysics*, 2014, vol. 55, no. 5–6, p. 745–776.
- 35. Shvartsev S.L., Ryzhenko B.N., Alekseev V.A., Dutova E.M., Kondratieva I.A., Kopylova Yu.G., Lepokurova O.E. Geological evolution and self-organizing of water–rock system. Vol. 1. Water–rock system in conditions of a zone of active water exchange. Ed. by B.N. Ryzhenko. Novosibirsk, Siberian Branch of the Russian Academy of Science Publ. house, 2007. 389 p. (In Russ.)
- 36. Isayev V.I., Galiyeva M.F., Aleyeva A.O., Lobova G.A., Starostenko V.I., Fomin A.N. Paleotemperature modeling of hydrocarbon generation centers and their role in the formation of "Paleozoic" oil deposits (Ostaninskoye field, Tomsk region). *Georesources*, 2021, vol. 23, no. 1, p. 2–16. (In Russ.) DOI: https://doi.org/10.18599/grs.2021.1.1
- 37. Condition of the geological environment (subsoil) in the territory of Siberian Federal District in 2022. Informational bulletin. Vol. 19. Tomsk, Filial «Sibirskiy regionalny tsentr GMSN», Gidrospetsgeologiya Publ., 2023. 242 p. (In Russ.)
- 38. Zemtsov V., Savichev O., Petrova V. The mechanism and regularities of ion runoff formation in the Ob River (Western Siberia) under the Influence of its tributaries and underground feeding. *Water*, 2023, vol. 15, pp. 2413. DOI: 10.3390/w15132413.

- 39. Savichev O.G. Changes in hydrogeological conditions during swagging in the South-East of the West Siberian plain. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering, 2024, vol. 335, no. 2, p. 170–186. (In Russ.) DOI: 10.18799/24131830/2024/2/4535.
- 40. Determination of the main calculated hydrological characteristics. Determination of the main design hydrological characteristics. Moscow, Ministry of Construction of the Russian Federation Publ., 2023. 152 p. (In Russ.)
- 41. Nash J.E., Sutcliffe J.V. River flow forecasting through conceptual models. P. I. A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 1970, no. 10 (3), pp. 282–290.
- 42. Methodological recommendations for determining the calculated hydrological characteristics in the absence of hydrometric observations. Eds. A.V. Rozhdestvensky, A.G. Lobanova. St. Petersburg, Nestor-History Publ., 2009. 193 p. (In Russ.)
- 43. Gelfan A.N. Dynamic-stochastic modeling of the formation of snowmelt runoff. Moscow, Nauka Publ., 2007. 279 p. (In Russ.)
- 44. Gusev E.M., Nasonova O.N. Modelling of heat and mass transfer of the land surface to the atmosphere. Moscow, Nauka Publ., 2010. 327 p. (In Russ.)
- 45. Recommendations for calculating evaporation from the land surface. Eds. P.P. Kuzmin, S.M. Alpatiev. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1976. 114 p.
- 46. Basic hydrological characteristics. Vol. 15. Altai, Western Siberia and Northern Kazakhstan. Iss. 1. Upper and Middle Ob. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1979. 488 p. (In Russ.)
- 47. SP 131.13330.2020. Building climatology climatology. Moscow, Standartinform Publ., 2021. 228 p. (In Russ.)
- 48. Water cadastre. Surface and groundwater resources, their use and quality. 2022. St. Petersburg, Roshydromet Publ., 2023. 153 p. (In Russ.)
- 49. On the state and protection of the environment of the Russian Federation in 2022. State report. Moscow, Ministry of Natural Resources of Russia; Lomonosov Moscow State University Publ., 2023. 686 p. (In Russ.)
- 50. Water Code of the Russian Federation (as amended on August 4, 2023) (version effective from September 1, 2023). Code of the Russian Federation of 03.06.2006 N 74-FZ. Moscow, Kremlin Publ., 2023. 52 p. (In Russ.)
- 51. SS 19179-73. Land hydrology. Terms and definitions. Moscow, Gosstandart of the USSR Publ., 1988. 47 p. (In Russ.)
- 52. SP 47.13330.2016. Engineering survey for construction. Basic principles, Moscow, Standartinform Publ., 2016. 111 p. (In Russ.)
- 53. *Technical Regulations. Basic Documents.* No. 2. Vol. III. Hydrology. 2021 edition. WMO-No. 49. Geneva, Switzerland, World Meteorological Organization (WMO), 2021. 21 p.
- 54. STO GGI 52.08.37-2015. Moisture reserves and soil freezing, evaporation from soil and water surface under regional climate change. Recommendations for calculation and forecast of average long-term changes. St Petersburg, ART-XPRESS Publ., 2015. 40 p. (In Russ.)
- 55. Shvartseva O., Gaskova O., Yurtaev A., Boguslavsky A., Kolpakova M., Mashkova D. Water–rock–organic matter interactions in wetland ecosystem: hydrogeochemical investigation and computer modeling. *Water*, 2024, vol. 16, pp. 428. DOI: 10.3390/w16030428.
- 56. Aleshina A., Rusakova M.A., Drozdova O.Y., Pokrovsky O.S., Lapitskiy S.A. Dissolved iron and organic matter in Boreal rivers across a South–North transect. *Environments*, 2024, vol. 11, pp. 65. DOI: 10.3390/environments11040065.
- 57. Kuzmina D., Loiko S.V., Lim A.G., Istigechev G.I., Kulizhsky S.P., Julien F., Rols J.L., Pokrovsky O.S. Macro- and micronutrient release from ash and litter in permafrost-affected forest. *Geoderma*, 2024, vol. 447, pp. 116925. DOI: 10.1016/j.geoderma.2024.116925.
- 58. Gorokhova I.V., Zyateva O.F. Geochemistry of mineral waters of the Upper Cretaceous deposits in the village. Melnikovo of the Tomsk region. *Obskoy vestnik*, 2001, no. 1, pp. 110–113. (In Russ.)
- 59. Kolokolova O.V. Geochemistry of groundwater in the Tomsk water intake area. Cand. Diss. Abstract. Tomsk, 2003. 21 p. (In Russ.)
- 60. Liss O.L., Abramova L.I., Avetov N.A. Bog of Western Siberia and their conservation value. Tula, Grif i K° Publ., 2001. 584 p. (In Russ.).
- Minayeva T., Bleuten W., Sirin A., Lapshina E.D. Eurasian mires of the Southern Taiga Belt: modern features and response to Holocene palaeoclimate. *Wetlands and Natural Resource Management. Ecological Studies*. Eds. J.T.A. Verhoeven, B. Beltman, R. Bobbink, D.F. Whigham. Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag, 2006, vol. 190, pp. 315–341.
- 62. Hu S., Niu Zh., Chen Y., Li L., Zhang H. Global wetlands: potential distribution, wetland loss, and status. *Science of the Total Environment*, 2017, vol. 586, pp. 319–327. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.02.001.
- Rudmin M., Banerjee S., Maximov P., Novoselov A., Trubin Y., Smirnov P., Abersteiner A., Tang D., Mazurov A. Origin of ooids, peloids and micro-oncoids of marine ironstone deposits in Western Siberia (Russia). *Journal of Asian Earth Sciences*, 2022, vol. 237, pp. 105361. DOI: 10.1016/J.JSEAES.2022.105361.
- 64. Domarenko V.A., Pshenichkin A.Ya, Dmitriyenko V.P., Peregudina E.V., Kenesbayev B.K. West Siberian iron ore belt: problems and prospects. Tomsk, OC "CTT" Publ., 2024. 180 p. (In Russ.)

#### Information about the authors

**Oleg G. Savichev,** Dr. Sc., Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. OSavichev@mail.ru; https://orcid.org/0000-0002-9561-953X

Received: 07.03.2025 Revised: 02.04.2025 Accepted: 10.04.2025 УДК 549.324; 551.351; 552.144 DOI: 10.18799/24131830/2025/5/5051 Шифр специальности ВАК: 1.6.4 Научная статья

# Аутигенный пирит континентального склона моря Лаптевых: влияние разгрузки метансодержащих флюидов

# А.С. Рубан<sup>1⊠</sup>, М.А. Рудмин<sup>1</sup>, О.В. Дударев<sup>2</sup>, И.П. Семилетов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск <sup>2</sup> Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, Россия, г. Владивосток

<sup>⊠</sup>ruban@tpu.ru

Аннотация. Актуальность. Пирит является одним из наиболее распространенных аутигенных минералов как в зонах разгрузки метансодержащих флюидов, так и в морских осадочных системах в целом, что подчеркивает его важность в процессах раннего диагенеза. Изучение механизмов его образования и роли в биогеохимических циклах различных химических элементов критично для более глубокого понимания процессов, протекающих в системах холодного просачивания. Цель. Оценка влияния просачивания метансодержащих флюидов на морфологию и микроэлементный состав осадочного пирита. Методы. Сканирующая электронная микроскопия, просвечивающая электронная микроскопия, рентгеновская микротомография, масс-спектрометрия с индуктивно-связанной плазмой и лазерной абляцией. Результаты и выводы. Выделены следующие типы пирита: сферические и полигональные фрамбоиды, фрамбоиды со вторичными радиальными наростами, стержневидные агрегаты, идиоморфные и гипидиоморфные кристаллы пирита. В донных осадках и карбонатных корках преобладают разные текстурные типы пирита, что отражает влияние вмещающей среды на его морфологию. Ассоциация пирита с метан-производными карбонатами, а также характерная морфология свидетельствуют о доминирующей роли сульфат-управляемого анаэробного окисления метана в процессах сульфидообразования на исследуемом участке. Уровень концентраций редокс-чувствительных элементов в донных осадках, карбонатных корках и пирите указывает на то, что пирит служит важным аутигенным компонентом, концентрирующим некоторые редокс-чувствительные элементы. Сравнение полученных результатов с опубликованными данными о микроэлементном составе осадочного пирита, сформированного в результате органокластической сульфат-редукции, выявило обогащение пирита на исследуемом участке всеми рассматриваемыми микроэлементами.

Ключевые слова: пирит, микроэлементы, анаэробное окисление метана, метановые сипы, море Лаптевых

Благодарности: Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 23-77-10002 «Метановые сипы как уникальные минералообразующие системы в морях Российской Арктики»; сканирующая электронная микроскопия, просвечивающая электронная микроскопия, масс-спектрометрия с индуктивносвязанной плазмой и лазерной абляцией) и Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FSWW-2023-0010; рентгеновская микротомография).

**Для цитирования:** Аутигенный пирит континентального склона моря Лаптевых: влияние разгрузки метансодержащих флюидов / А.С. Рубан, М.А. Рудмин, О.В. Дударев, И.П. Семилетов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 5. – С. 159–173. DOI: 10.18799/24131830/2025/5/5051

UDC 549.324; 551.351; 552.144 DOI: 10.18799/24131830/2025/5/5051 Scientific paper

# Authigenic pyrite from the Laptev Sea continental slope: the impact of methane seepage activity

# A.S. Ruban<sup>1⊠</sup>, M.A. Rudmin<sup>1</sup>, O.V. Dudarev<sup>2</sup>, I.P. Semiletov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation <sup>2</sup> Pacific Oceanological Institute of Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russian Federation

<sup>⊠</sup>ruban@tpu.ru

**Abstract.** *Relevance.* Pyrite is one of the most widespread authigenic minerals both in methane fluid seepage zones and in marine sedimentary systems in general, highlighting its importance in early diagenetic processes. Studying the mechanisms of its formation and its role in the biogeochemical cycles of various chemical elements is critical for a deeper understanding of processes occurring in cold seep systems. *Aim.* To assess the impact of methane fluid seepage on the morphology and trace element composition of sedimentary pyrite. *Methods.* Scanning electron microscopy, transmission electron microscopy, X-ray microtomography, inductively coupled plasma mass spectrometry and laser ablation. *Results and Conclusions.* Based on morphological features, the following types of pyrite were identified: spherical and polygonal framboids, framboids with secondary radial overgrowths, rod-like aggregates, euhedral and subhedral pyrite crystals. Different textural types of pyrite prevail in the sediment and carbonate crusts, reflecting the influence of the host environment on its morphology. The association of pyrite with methane-derived carbonates, as well as its characteristic morphology, suggests the dominant role of sulfate-driven anaerobic oxidation of methane in sulfide formation at the studied site. The concentrations of redox-sensitive elements in the sediment, carbonate crusts, and pyrite indicate that pyrite serves as the important authigenic component accumulating some redox-sensitive elements. A comparison of the obtained results with published data on the trace element composition of sedimentary pyrite formed by organoclastic sulfate reduction revealed that pyrite at the studied site is enriched with all the considered trace elements.

Keywords: pyrite, trace elements, methane anaerobic oxidation, cold methane seeps, Laptev Sea

**Acknowledgements:** Research was financially supported by the Russian Science Foundation (grant no. 23-77-10002 "Methane seeps as unique mineral-forming systems in the seas of Russian Arctic"; scanning electron microscopy, transmission electron microscopy, inductively coupled plasma mass spectrometry and laser ablation) and Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project no. FSWW-2023-0010; X-ray microtomography).

**For citation:** Ruban A.S., Rudmin M.A., Dudarev O.V., Semiletov I.P. Authigenic pyrite from the Laptev Sea continental slope: the impact of methane seepage activity. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Asset Engineering*, 2025, vol. 336, no. 5, pp. 159–173. DOI: 10.18799/24131830/2025/5/5051

# Введение

Пирит - один из основных аутигенных минералов в морских осадках [1]. Благодаря высокой диагенетической стабильности он считается важнейшим сульфидом железа с точки зрения изучения условий раннего диагенеза [2]. Образование пирита в морских осадочных системах происходит при взаимодействии сероводорода (H<sub>2</sub>S), продуцируемого в результате микробного восстановления сульфата морской воды, с ионами двухвалентного железа (Fe<sup>2+</sup>). Этот процесс контролируется множеством факторов, включая не только концентрации сероводорода и железа в поровой воде, но и степень разложения органического вещества, наличие метана (или других углеводородов), скорость осадконакопления и локальные физико-химические условия диагенеза [3]. В типичных морских условиях основным механизмом образования сульфидов железа является органокластическая сульфатредукция. Однако в условиях холодного просачивания метансодержащих флюидов (метановые сипы), а также в гидротермальных средах органокластическая сульфатредукция играет значительно меньшую роль в формировании сульфидной минерализации.

Будучи широко распространённым явлением в Мировом океане, метановые сипы рассматриваются в качестве одного из важнейших природных источников эмиссии метана [4]. Тем не менее недавнее исследование показывает, что до 80–90 % просачивающегося метана может потребляться микроорганизмами в результате сульфат-управляемого анаэробного окисления метана (СУ-АОМ) [5]. Следовательно, СУ-АОМ служит в роли эффективного естественного механизма, не только лимитирующего выброс метана в атмосферу, но и способствующего секвестрации углерода в карбонатах. В результате СУ-АОМ продуцируется значительное количество H<sub>2</sub>S, концентрации которого могут быть эквивалентны концентрациям потребляемого сульфата [6].

При достаточных концентрациях Fe<sup>2+</sup> в поровой воде происходит осаждение метастабильных моносульфидов или полисульфидов железа (например, макинавит и грейгит соответственно), которые впоследствии переходят в пирит [7]. В то же время образование пирита может происходить непосредственно без предшественника – моносульфида железа [8]. Таким образом, при просачивании метана содержание органического вещества не является критическим фактором для образования сульфидов.

Осадочный пирит играет важную роль в биогеохимических циклах углерода, серы и железа [2]. Как конечный продукт сульфатредукции, он замыкает биогеохимический цикл серы, тем самым регулируя баланс между её растворенными и осажденными формами. Кроме того, раннедиагенетические сульфиды железа являются важным поглотителем многих редокс-чувствительных элементов в морских осадках [10], что обусловлено значительным влиянием сульфатредукции на их поведение в ходе раннего диагенеза [11]. Микроэлементы могут входить в кристаллическую решетку пирита либо присутствовать в виде микровключений самостоятельных сульфидных фаз. Обогащение сульфидов железа контролируется содержанием микроэлементов в поровой воде, которое определяется различными факторами, включая микроэлементный состав морской воды [10], состав органического материала [12], флюидную активность [13]. Многие микроэлементы включаются в моносульфиды на ранних стадиях формирования, в результате чего раннедиагенетическим сульфидам свойственен наиболее богатый микроэлементный состав [14]. Это делает их наиболее информативным инструментом для изучения состава морской воды и условий диагенеза по сравнению с позднедиагенетическим пиритом [10]. В условиях просачивания метансодержащих флюидов СУ-АОМ может существенно влиять на микроэлементный состав пирита за счет увеличении степени пиритизации и переноса микроэлементов из подстилающих осадочных горизонтов [13, 15]. Обогащение донных осадков и аутигенных карбонатов метановых сипов редокс-чувствительными элементами активно исследуется многими исследователями на протяжении двух последних десятилетий [11, 16-19]. Несмотря на ряд недавних исследований [15, 20, 21], вопросы о роли формирующихся в условиях СУ-АОМ сульфидов в геохимических циклах элементов остаются менее изученными и требуют дальнейших исследований.



- Рис. 1. Расположение океанографической станции АМК-6939, где были отобраны изученные донные осадки и аутигенные карбонатные корки, и некоторые структурные элементы бассейна моря Лаптевых по данным [9]: 1 – погребенная спрединговая ось хребта Гаккеля; 2 – разрывные нарушения рифтовой системы моря Лаптевых; 3 – Хатангско-Ломоносовская зона разломов
- Fig. 1. Location of the oceanographic station AMK-6939, where the studied bottom sediments and authigenic carbonate crusts were sampled, and some structural elements of the Laptev Sea Basin according to the data [9]: 1- axis of the buried spreading zone of the Gakkel Ridge; 2 - the Laptev Sea rift system; 3 - the Khatanga-Lomonosov zone of faults

В данной работе мы фокусируемся на изучении морфологических особенностей и микроэлементного состава пирита, сформированного в условиях сульфат-управляемого анаэробного окисления метана. Цель исследования заключается в оценке влияния просачивания метансодержащих флюидов на морфологию и микроэлементный состав осадочного пирита. Полученные результаты помогут лучше определить роль пирита как индикатора СУ-АОМ как в современных, так и в древних морских осадочных системах.

#### Район исследования

Море Лаптевых - это окраинное море Северного Ледовитого океана, около 70 % площади которого представлено шельфом с глубинами менее 100 м. Осадки моря Лаптевых имеют преимущественно терригенное происхождение, а главными источниками материала является твердый сток впадающих рек (Лена, Хатанга, Яна и др.) и береговая эрозия островов и Северного побережья Евразии [22, 23]. Лаптевоморский бассейн расположен на сочленении трех крупных тектонических структур: древней Сибирской платформы, позднемезозойской Верхояно-Колымской складчатой системы и молодого Евразийского океанического бассейна с хребтом Гаккеля [24], который является продолжением Срединно-Атлантического хребта в бассейне Северного Ледовитого океана. В пределах континентального склона хребет Гаккеля сочленяется с рифтовой системой моря Лаптевых (рис. 1) [9]. Обе эти структуры являются сегментами дивергентной границы между Северо-Американской и Евразийской литосферными плитами [25]. Рифтовая система моря Лаптевых представлена системой горстов и грабенов, ограниченных разрывными нарушениями СЗ-ЮВ и С-Ю простирания с амплитудами смещения до 2 км. В области континентального шельфа рифтовая система моря Лаптевых пересекается Хатангско-Ломоносовской зоной разломов. Сейсмические данные демонстрируют наличие в осадочном разрезе многочисленных потенциально газонасыщенных объектов, залегающих, как правило, на глубинах менее 200 м от поверхности морского дна [26]. Кроме того, в пределах континентального склона выявлен субпараллельный дну отражающий (bottom simulating reflector) горизонт, который может соответствовать подошве зоны стабильности газовых гидратов [26].

Холодные просачивания метана обнаружены в различных районах моря Лаптевых – на внутреннем шельфе, внешнем шельфе и континентальном склоне [4, 27]. Ранее было установлено, что в подверженных холодному просачиванию донных осадках на внешнем шельфе и континентальном склоне моря Лаптевых проявлена аутигенная карбонатная и сульфидная минерализации [27–30].

# Материал и методы

Изученные образцы пиритсодержащих аутигенных карбонатов и вмещающих их донных осадков были отобраны на континентальном склоне моря Лаптевых в пределах участка с зарегистрированной разгрузкой метансодержащих флюидов (станция АМК-6939; рис. 1). Глубина моря на этом участке 294 м. Образцы были получены в ходе рейса НИС «Академик Мстислав Келдыш» с помощью грейферного дночерпателя. Максимальная глубина опробования не превышала 40 см относительно поверхности морского дна. Изотопный состав углерода в аутигенных карбонатах, отобранных на этом же участке ( $\delta^{13}$ C= -50,6...-32,4 ‰ V-PDB), указывает на первостепенную роль анаэробного окисления метана в их формировании, а гидроакустические исследования отражают активность просачивания метана в настоящее время [27].

Для аналитических работ из донных осадков и фрагментов карбонатов были изготовлены полированные эпоксидные шашки диаметром 25 мм. Помимо этого, крупные агрегаты пирита были отобраны вручную с использованием бинокуляра после просеивания навески донных осадков мокрым способом через сито с размером ячеек сетки 63 мкм. Изучение морфологии пирита выполнялось на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) TESCAN VEGA 3 SBU, оборудованном детектором OXFORD X-Max 50 для рентгенофлуоресцентного энергодисперсионного анализа (ЭДС). СЭМ съемка и ЭДС анализ проводились при следующих параметрах: ускоряющее напряжение - 20 кВ, интенсивность тока зонда – 3...12 нА. В дополнение к СЭМ внутренняя структура фрамбоидов, включая морфологию слагающих их микрокристаллов, исследовалась с использованием просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ, JEOL JEM-2100F) в Центре коллективного пользования «Наноматериалы и нанотехнологии» Томского политехнического университета. Съемка выполнялась в режиме просвечивания. В качестве образцов были использованы отобранные под бинокуляром стержневидные агрегаты пирита, подготовленные к анализу методом ионного утонения. Для получения объемных изображений карбонатных корок и анализа распределения пирита в них использовалась микрофокусная рентгеновская компьютерная томография (YXLON Cheetah EVO).

Содержание микроэлементов в пирите изучалось методом масс-спектрометрии с индуктивносвязанной плазмой и лазерной абляцией (ЛА ИСП-МС) с использованием квадрупольного массспектрометра Thermo XSeries2 и лазерной приставки New Wave UP-213. Параметры лазера: диаметр пучка 40–65 мкм для линии и 60–80 мкм для точки; энергия 5–7 Дж/см<sup>2</sup>; частота 10 Гц, скорость абляции при анализе вдоль линии составляла 10 мкм/с. Газ-носитель состоял из смеси гелия (0,5 л/мин) и аргона (0,7 л/мин). Для внешней калибровки использовался стандарт UQAC FeS-1, полученный из порошка природного сульфида, легированного следовыми элементами. Для верификации результатов использовался синтетический полиметаллический сульфид MASS-1 (Геологическая служба США). Расчет данных производился в приложении Iolite. Концентрации микроэлементов в донных осадках и карбонатных корках были определены методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ИСП-МС) с использованием прибора ELAN DRC-e (PerkinElmer Inc.).

# Результаты

Морфология пирита. На основании морфологических особенностей выделены следующие типы пирита: (i) сферические и полигональные фрамбоиды и их скопления (фрамбоидные кластеры; рис. 2, А, Д, Е), (ii) фрамбоиды со вторичными радиальными наростами (агрегаты "sunflower"; рис. 2, Б), (iii) стержневидные агрегаты (рис. 2, В), (iv) идиоморфные и гипидиоморфные кристаллы пирита и их скопления (рис. 2, 3). В зависимости от вмещающей среды (донные осадки vs. карбонатные корки) преобладают те или иные морфологические типы пирита.

Пирит в донных осадках представлен главным образом фрамбоидами со вторичными радиальными наростами, а также стержневидными агрегатами. Первые чаще встречаются в виде кластеров, в строении которых участвуют от трёх до нескольких десятков отдельных агрегатов. Диаметр этих агрегатов изменяется в пределах от 2,9 до 49,1 µm со средним значением 11,8 µm и стандартным отклонением 7,1 µm (рис. 3, A). При этом преобладают агрегаты с размером от 5 до 15 µm (~73 %). Фрамбоидальное ядро сложено субмикронными микрокристаллами сферической, октаэрической, пентагондодекаэдрической форм, которые в большинстве случаев не имеют выраженной ориентировки (рис. 2, 4). Стержневидные агрегаты пирита (рис. 2, В) представляют собой скопления как фрамбоидов, так и отдельных зерен неправильной и гипидиоморфной формы. Эти агрегаты достигают 1,5 мм в длину и 200 мкм в диаметре. На срезе видны полости в их центральной части, однако отсутствие сплошного полого канала не позволяет идентифицировать эти агрегаты как трубки. Значительно реже фрамбоидов и стержневидных агрегатов встречаются идиоморфные и гипидиоморфные кристаллы, размер которых не превышает 5 мкм. Как правило, они приурочены к скоплениям фрамбоидов со вторичными радиальными наростами или участвуют в строении стержневидных агрегатов. Редко наблюдаются скопления подобных кристаллов (рис. 2, 3).

Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2025. Т. 336. № 5. С. 159–173 Рубан А.С. и др. Аутигенный пирит континентального склона моря Лаптевых: влияние разгрузки метансодержащих ...



Рис. 2. СЭМ-снимки, демонстрирующие морфологию аутигенного пирита в изученных образцах донных осадков (А, Б, В, Ж, З, И) и карбонатных корок (Г, Д, Е): А – скопление сферических фрамбоидов; Б – фрамбоиды с радиальными наростами (arperamы "sunflowers"); В – стержневидный arperam пирита; Г – распределение различных морфологических типов пирита в карбонатном стяжении; Д, Е – скопление полигональных фрамбоидов; Ж – фрамбоид с ориентированной внутренней структурой; З – скопление гипидиоморфных кристаллов пирита; И) «деформированный» фрамбоид пирита внутри стержневидного агрегата

Fig. 2. SEM images demonstrating the morphology of authigenic pyrite in the studied samples of sediments (A, B, C, G, H, I) and carbonate crusts (D, E, F): A – cluster of spherical framboids; B – framboids with radial overgrowths (sunflower aggregates); C – rod-like aggregate; D – distribution of various morphological types of pyrite in the carbonate crust; E, F – cluster of polygonal framboids; G – framboid with regular internal structure; H – cluster of subhedral pyrite crystals; I – "deformed" framboid within a rod-like aggregate

Основными морфологическими типами пирита в карбонатных корках являются сферические и полигональные фраибоиды, фрамбоиды со вторичными радиальными наростами и стержневидные агрегаты (рис. 2, 5). Текстурные взаимоотношения между агрегатами пирита и карбонатным цементом указывают на то, что формирование пирита происходило как до, так и после кристаллизации карбоната. Главная отличительная особенность пирита, присутствующего в составе карбонатных образований, заключается в полигональности фрамбоидов. В зависимости от внутренней ориентировки микрокристаллов фрамбоиды можно разделить на два типа: (1) с неориентированной внутренней структурой (рис. 2, А, И) и (2) с ориентированной внутренней структурой (рис. 2, Ж). Независимо от внутренней структуры фрамбоиды (или фрамбоидальные ядра) сложены как сферическими гранулами, так и микрокристаллами по форме октаэдра или пентагондодекаэдра. В обоих случаях размер гранул/микрокристаллов колеблется в пределах от 0,5 до 1,0 мкм (рис. 4). Диаметры большей части измеренных фрамбоидов варьируют в диапазоне от 5 до 10 мкм, при этом среднее значение составляет 8,5 мкм, что меньше, чем у пирита, рассеянного в донных осадках (рис. 3). Значение стандартного отклонения также меньше (SD=5,2), что указывает на меньший разброс размеров. В целом диаметр сферических агрегатов пирита в карбонатных корках варьирует от 1,9 до 33,1 мкм (рис. 3, Б).

*Микроэлементный состав пирита.* Рис. 6 демонстрирует распределение некоторых редоксчувствительных элементов в двух рассматриваемых группах пирита в зависимости от вмещающей среды – донные осадки и карбонатные корки. Согласно полученным результатам, разброс концентраций микроэлементов как в разных образцах, так и в пределах одного образца достигает нескольких порядков. Содержание микроэлементов в пирите в целом можно описать в порядке убывания следующим образом: As (среднее – 741 ppm ) > Mo (среднее – 330 ppm ) > Co (среднее – 219 ppm) > Xi (среднее – 241 ppm) > Cu (среднее – 19,8 ppm). Со и Ni демонстрируют относительно стабильное распределение, без значительных аномалий, их концентрации находятся в диапазоне от десятков до сотен ррт, причём медианные значения в обеих группах схожи. В отличие от них, Си и Zn проявляют более выраженный разброс значений, особенно в пирите карбонатных корок, где максимальные концентрации Zn достигают почти 1000 ppm. As и Мо демонстрируют наиболее выраженную вариабельность, причём их максимальные значения характерны именно для пирита в карбонатных корках. Sb, хотя и характеризуется более умеренными вариациями, также имеет тенденцию к повышенным концентрациям в карбонатных корках по сравнению с рассеянным в донных осадках пиритом.

Сопоставление концентраций микроэлементов в пирите с их валовым содержанием во вмещающих донных осадках и карбонатных корках отражает различия в уровнях накопления (таблица, рис. 6). В целом пирит из обеих сред демонстрирует значительно более высокие концентрации элементов, обладающих высоким сродством к сульфидам, таких как As, Mo и Sb, по сравнению с их содержанием в осадках и карбонатах. Например, содержание мышьяка в пирите карбонатных корок превышает его валовые концентрации в карбонатах почти на два порядка. Аналогичная тенденция наблюдается для сурьмы и молибдена. Сравнение полученных результатов с опубликованными данными по микроэлементному составу осадочного пирита, сформированного при органокластической сульфатредукции (на примере Южно-Китайского моря [20, 21]), показывает значительное обогащение исследуемого пирита рассматриваемыми микроэлементами.



**Рис. 3.** Гистограммы распределения диаметров фрамбоидов пирита: (А) в донных осадках и (Б) карбонатных корках: п – количество измеренных фрамбоидов; тіп – минимальный диаметр; тах – максимальный диаметр; MD – средний диаметр; SD стандартное отклонение





**Рис. 4.** Внутреннее строение фрамбоида пирита и форма слагающих его микрокристаллов. Фотографии получены на просвечивающем электронном микроскопе

*Fig. 4.* Internal structure of a pyrite framboid and the shape of its constituent microcrystals. Images are obtained using transmission electron microscopy

#### Обсуждение

Влияние вмещающей среды на морфологию пирита. Образование фрамбоидов пирита может происходить двумя путями - сингенетическим и диагенетическим. В первом случае фрамбоиды формируются непосредственно в водной толще и впоследствии захораниваются в донных осадках, где их дальнейший рост прекращается [31, 32]. Этот сценарий образования фрамбоидального пирита характерен только для бассейнов с эвксиновыми условиями [32]. При кислородной или субкислородной обстановке в придонном горизонте водной толщи формирование фрамбоидов происходит в донных осадках, т. е. диагенетическим путем [2]. Различие в механизмах формирования сказывается на диаметре образующихся фрамбоидов [31]. Так, средний диаметр современных сингенетических фрамбоидов составляет 4,7 мкм, а диагенетических - 6,7 мкм [33]. Средний диаметр фрамбоидов в изученных нами образцах с континентального склона моря Лаптевых составляет 8,5 мкм для пирита в карбонатных корках и 11,8 мкм для пирита в донных осадках. При этом диаметр отдельных фрамбоидов достигает 49 мкм, что вместе со средним диаметром свидетельствует о диагенетическом происхождении пирита.

Исследования размерных характеристик пирита, формирующегося под влиянием просачивания метан-содержащих флюидов, показывают, что в СМТЗ пирит способен вырастать в достаточно крупные индивиды, при этом демонстрируя достаточно широкий разброс диаметров. В работах [34, 35] сообщалось о том, что средний диаметр фрамбоидов пирита, формирующегося в условиях просачивания метан-содержащих флюидов, превышает 20 мкм, что может объясняться непрерывным поступлением Fe<sup>2+</sup> и H<sub>2</sub>S. Значения стандартного отклонения при этом могут достигать 17,8 [5], что отражает широкий разброс диаметров фрамбоидов. В изученных донных осадках континентального склона моря Лаптевых фрамбоиды с диаметром выше 20 мкм редки, а большая часть измеренных фрамбоидов (>90 %) укладывается в диапазон от 0 до 20 мкм. При этом, несмотря на малый средний диаметр фрамбоидов, размер отдельных индивидов достигает 49 мкм. Кроме того, в отложениях континентального склона широко распространены стержневидные агрегаты пирита (Рис. 2, В), представляющие собой скопления фрамбоидов с диаметром 10-15 мкм, иногда сцементированные карбонатным цементом. По одной из версий считается, что стержневидные агрегаты являются псевдоморфой бактерий [36], по другой – стержневидный пиобразуется в каналах миграции метанрит содержащего флюида [34, 35]. То есть обилие пирита, широкий разброс диаметров фрамбоидов и его специфичная морфология в виде стержневидных агрегатов и крупных фрамбоидов свидетельствуют о том, что его формирование происходило в условиях СУ-АОМ. Однако малый диаметр большинства измеренных фрамбоидов не согласуется с ранее полученными представлениями о размере пирита, образующегося в сульфат-метановых транзитных зонах.

Одним из наиболее проявленных морфологических типов пирита в донных осадках являются фрамбоиды с радиальными наростами. Формирование вторичной корки наростов связывают с изменениями условий роста фрамбоида, которые могут заключаться в снижении степени насыщения порового раствора реакционноспособным железом и  $H_2S$  [7, 37]. При этом снижение концентраций прекурсоров может ограничивать формирование новых фрамбоидов пирита, но не препятствует зарастанию ранее образованных фрамбоидов вторичной коркой [7, 15, 37].

Таблица. Концентрации некоторых химических элементов в исследуемых образцах донных осадков и карбонатных корок (данные ИСП-МС), аутигенном пирите, содержащемся в них (данные ЛА-ИСП-МС), и осадочном пирите Южно-Китайского моря, формирование которого не связано с СУ-АОМ

Table.Concentrations of some chemical elements in the studied samples of sediments and carbonate crusts (ICP-MS data),<br/>in the authigenic pyrite contained therein (LA-ICP-MS data), and in the sedimentary pyrite of the South China Sea,<br/>which formation is not associated with SD-AOM

Тип образца/Sample type	Со	Ni	Cu	Zn	As	Мо	Sb
Пирит в карбонатных корках	24,81071	58873	8,5807	15,9562	66,73190	54868	0,8240,9
Pyrite of carbonates (n=29)	261	252	172	162	1056	336	17,9
Пирит в донных осадках	13,71257	62680	57870	12,72060	53,31250	115959	4,686
Pyrite of sediments (n=32)	241	231	262	151	455	324	21,4
Карбонатные корки	21,128,8	21,055,8	13,721,2	44,459,1	1,7339,9	7,2021,7	0,301,85
Carbonate crusts (n=9)	23,8	28,2	17,7	53,6	17,2	13,6	1,0
Донные осадки/Sediments	22,7	31,6	38,8	114	20,3	24,0	0,59
	1,1223,9	3,5539,3	4,9138,9	19,2107	30,7611	2,7424,3	
Южно-Китайское море	6,19	12,2	16,2	45,2	213	12,1	-
South China Sea [20, 21]	1,036	21172	0,42,9	4,612,7	302756	59139	3,218,7
	14,5	78,5	0,95	7,7	563	97	8,1



**Puc. 5.** 3D-модель фрагмента карбонатной корки, иллюстрирующая распределение пирита **Fig. 5.** 3D model of the carbonate crust fragment illustrating pyrite distribution

По-видимому, благоприятные условия для зарождения фрамбоидов и их непрерывного роста существовали непродолжительный период, а последующие изменения среды диагенеза способствовали зарастанию фрамбоидов вторичными наростами. Вероятной причиной, вызвавшей изменение диагенетических условий, может являться вертикальная миграция СМТЗ. Как упоминалось выше, изученный фактический материал отобран с глубины менее 40 см ниже морского дна, что может косвенно указывать на положение СМТЗ непосредственно на границе «донные осадки-морская вода», как это было установлено для внешнего шельфа [38]. При этом анализируемые образцы донных осадков не имели отличительных черт, характерных для осадков СМТЗ, - насыщенный черный цвет и выраженный запах сероводорода. В.И. Богоявленский с соавторами [26] сообщали о наличии признаков оползневых процессов в сейсмических разрезах, полученных на континентальном склоне моря Лаптевых. Учитывая этот факт, мы склонны полагать что периодические «сползание» поверхностного слоя донных осадков на исследуемом участке континентального склона могло

способствовать нисходящей миграции СМТЗ. Формирование сульфидной минерализации, повидимому, происходило на большей глубине относительно границы «вода–осадок», а их текущее близповерхностное положение является следствием оползневых процессов, которые могли быть вызваны различными факторами, включая диссоциацию газовых гидратов [39].

В отличие от донных осадков, где доминирующим морфологическим типом пирита являются фрамбоиды с радиальными наростами, в карбонатных корках широко проявлены полигональные фрамбоиды. Как правило, эти агрегаты не имеют правильных кристаллографических очертаний, но иногда их форма близка к пентагондодекаэдру или октаэдру (рис. 2, Д, Е). Полигональные фрамбоиды приурочены к плотноупакованным линейным и изометричным кластерам. Текстурные особенности указывают на более позднее формирование этих скоплений пирита относительно карбонатного цемента предположительно в результате циркуляции флюида через поровое пространство. При постоянном поступлении в поры перенасыщенного флюида формирование и рост фрамбоидов могут быть

ограничены отсутствием свободного пространства. В этом случае сферические фрамбоиды по мере своего роста будут приобретать грани за счет давления растущих по соседству фрамбоидов. Помимо карбонатных корок полигональные фрамбоиды также присутствуют в стержневидных агрегатах (рис. 2, И), где ограниченность пространства для роста также приводит к формированию полигональных фрамбоидов. Интересно, что рост фрамбоидов приводит не к увеличению внешнего диаметра стержневидного агрегата, а к их деформации. Таким образом, наблюдаемые в стержневидных агрегатах и карбонатных корках полигональные фрамбоиды, являются результатом деформации сферических фрамбоидов в условиях ограниченного пространства для роста. В тех случаях, когда в порах имеется свободное пространство для роста, фрамбоиды сохраняют сферическую форму.

Роль пирита в концентрировании редоксчувствительных элементов. Осадочный пирит считается одним из основных «поглотителей» различных микроэлементов, в особенности, чувствительных к окислительно-восстановительным условиям [40, 41]. Это делает его ценным объектом для исследования различных вопросов, среди которых условия и механизмы сульфидообразования [42], эволюция осадочной среды, химия океана и кислородный режим атмосферы в прошлые геологические эпохи [10, 43]. Кроме того, в ряде последних исследований осадочного пирита особое внимание уделяется влиянию геохимических условий, возникающих при просачивании метансодержащих флюидов, на микроэлементный состав его [15, 20, 44].

Как упоминалось выше, размерные характеристики фрамбоидов (рис. 3) указывают на диагенетическое происхождение пирита на исследуемом участке. Полученные концентрации молибдена в донных осадках и в карбонатных корках не превышают 24 ррт. Такие содержания Мо свидетельствует о том, что сульфидные условия были ограничены поровой водой и не распространялись на придонный горизонт морской воды [45]. Следовательно, можно предполагать, что микроэлементный состав пирита в исследуемых образцах главным образом контролируется гидрохимической спецификой поровой воды. Основными источниками растворенных в поровой воде микроэлементов в осадочных системах являются морская вода и терригенный материал [46]. В случаях холодного просачивания дополнительным источником микроэлементов может служить газосодержащий флюид, способствующий восходящей миграции растворенных микроэлементов с более глубоких горизонтов [11, 13]. С целью изучения аутигенной сульфидной минерализации ранее нами было проанализировано представительное количество образцов донных осадков моря Лаптевых, отобранных в различных частях акватории и охватывающих поверхностный горизонт осадочного разреза. Исследования показало, что в интервале 0-30 см донные осадки, не подверженные просачиванию метан-содержащих флюидов, практически лишены аутигенной сульфидной минерализации, за исключением редких находок единичных фрамбоидов диаметром не более 10 мкм. Это не позволило проанализировать микроэлементный состав пирита, формирование которого не связано с СУ-АОМ.



**Рис. 6.** Микроэлементный состав пирита в изученных образцах донных осадков и карбонатных корок по данным ЛА-ИСП-МС. Звездочки внутри ящиков обозначают медиану, границы ящиков соответствуют 25-му и 75-му перцентилям, «усы» показывают диапазон значений без выбросов, а точки отражают выбросы

*Fig. 6.* Trace element composition of pyrite in the studied samples of bottom sediments and carbonate crusts based on LA-ICP-MS data. Asterisks inside the boxes indicate the median, box boundaries correspond to the 25th and 75th percentiles, whiskers represent the range of values excluding outliers, and dots indicate outliers



**Рис. 7.** Диаграммы рассеяния, демонстрирующие корреляции между (A) As и Sb, (Б) Cu и Ni и (B) Co и Ni в пирите, ассоциированном с аутигенными карбонатами

*Fig. 7.* Scatterplots showing correlations between (A) As and Sb, (B) Cu and Ni, and (C) Co and Ni in pyrite associated with authigenic carbonates

Концентрации микроэлементов в валовых пробах донных осадков и карбонатных корок значительно ниже, чем в проанализированных агрегатах пирита (таблица). Безусловно, химический состав донных осадков во время формирования пирита мог несколько отличаться от текущего за счёт вероятных последующих изменений физикохимических условий. Кроме того, процессы формирования карбонатной и сульфидной минерализации, вероятно, были разобщены во времени, на что указывают текстурные взаимоотношения между пиритом и карбонатным цементом. Следовательно, уровень насыщения поровой воды микроэлементами также мог быть различным. Однако содержания таких элементов, как As, Mo, Sb, в пирите в десятки раз выше, чем во вмещающих осадках и карбонатах (таблица), что сложно объяснить различной степенью насыщения поровой воды.

As, Мо и Sb являются одними из наиболее накапливающихся микроэлементов в осадочных системах, связанных с просачиванием метансодержащих флюидов [11, 18, 47]. Более того, As, Mo и Sb относятся к числу микроэлементов с высокой степенью пиритизации [20, 40]. В насыщенной кислородом морской воде эти элементы существуют в виде химически стабильных оксианионов  $(AsO_4^{3-}, MoO_4^{2-} и Sb(OH)_6^{-})$  и эффективно захватываются оксидами/гидроксидами Fe и Mn, что способствует их миграции из морской воды в донные осадки [47]. В восстановительных условиях оксиды/гидроксиды Fe и Mn растворяются и высвобождают адсорбированные элементы в поровые воды [47], что приводит к увеличению их концентраций. Среди рассматриваемых микроэлементов значимые положительные корреляции выявлены между Со и Ni, Cu и Ni, а также между As и Sb (рис. 7). Однако выявленные корреляционные зависимости характерны только для пирита в карбонатах образованиях. Интересно, что Мо не коррелирует ни с Sb, ни с As, как это было продемонстрировано, например в [20]. С одной стороны это может указывать на то, что зоны концентрирования Mo, As, и Sb вертикально разобщены [20], с другой - на различные источники этих элементов (морская вода vs глубинные поровые воды, транспортируемые восходящим флюидом). Сравнение полученных результатов с опубликованными данными о микроэлементном составе осадочного пирита, формирование которого происходило в результате органокластической сульфат-редукции (на примере Южно-Китайского моря), выявило обогащение исследуемого пирита всеми рассматриваемыми микроэлементами (таблица). Кроме того, авторы [20, 21] не обнаружили обогащения Си и Zn в пирите, сформированном в условиях сульфат-управляемого анаэробного окисления метана. Си и Zn могут поступать в поровую воду из органического вещества при его разложении [11]. Однако в резковосстановительных условиях, возникающих при СУ-АОМ, высвобождение Zn и Cu из органической компоненты может ограничиваться низкой интенсивностью органокластической сульфатредукции [48]. Следовательно, наблюдаемое обогащение пирита Cu и Zn в изученных образцах, по-видимому, также может свидетельствовать в пользу дополнительного источника микроэлементов.

#### Заключение

В рамках данной работы были исследованы морфология и микроэлементный состав пирита, обнаруженного в донных осадках и аутигенных метан-производных карбонатах одной из зон разгрузки газонасыщенных флюидов в пределах континентального склона моря Лаптевых. Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы:

 ассоциация пирита с метан-производными карбонатами, а также его характерные текстурные формы (стержневидные агрегаты и крупные фрамбоиды) свидетельствует о доминирующей роли сульфат-управляемого анаэробного окисления метана в сульфидообразовании на исследуемом участке. При этом распределение фрамбоидов по размерам показывает, что диаметр большинства из них не превышает 20 мкм, что может отражать непродолжительный период существования благоприятных условий для их роста;

- вмещающая среда влияет на морфологические особенности пирита. Ограниченность пространства для роста фрамбоидов внутри карбонатов способствует формированию полигональных фрамбоидов за счет их механической деформации, а не в результате их текстурной эволюции;
- уровни концентраций редокс-чувствительных элементов в донных осадках, карбонатных корках и пирите указывают на то, что пирит служит важным аутигенным компонентом с позиции концентрирования некоторых редоксчувствительных элементов, насыщающих поровый раствор в результате СУ-АОМ;
- 4) микроэлементные составы пирита из донных осадков и карбонатных корок не имеют значительных различий, что свидетельствует о высокой проницаемости карбонатных образований для поровых растворов на стадии формирования сульфидной минерализации.

Исследование морфологической и геохимической специфики осадочного пирита, формирующегося в зонах разгрузки метансодержащих флюидов, может стать основой для выявления минералогогеохимических индикаторов, позволяющих реконструировать эпизоды метанового просачивания в древних осадочных системах. Дальнейшие исследования должны быть сфокусированы на детальном сравнительном анализе морфологических, геохимических и изотопных характеристик пирита из сульфат-метановых транзитных зон и «фоновых» осадков, не связанных с метановым просачиванием.

# СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Rickard D., Mussmann M., Steadman J.A. Sedimentary sulfides // Elements. 2017. Vol. 13. P. 117-122. DOI: 10.2113/gselements.13.2.117.
- Berner R.A. Sedimentary pyrite formation: an update // Geochimica et Cosmochimica Acta. 1984. Vol. 48. P. 605–615. DOI: 10.1016/0016-7037(84)90089-9.
- 3. Authigenic pyrite and gypsum minerals in offshore Zhoushan sediments: morphology, formation, and environmental implications / T. Sun, K. Cao, P. Yin, X. Jiang, Y. Tian // Frontiers in Earth Science. 2023. Vol. 11. P. 1–13. DOI: 10.3389/feart.2023.1165809.
- 4. The East Siberian Arctic Shelf: towards further assessment of permafrost-related methane fluxes and role of sea ice / N. Shakhova, I. Semiletov, V. Sergienko, L. Lobkovsky, V. Yusupov, A. Salyuk, A. Salomatin, D. Chernykh, D. Kosmach, G. Panteleev, D. Nicolsky, V. Samarkin, S. Joye, A. Charkin, O. Dudarev, A. Meluzov, O. Gustafsson // Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 2015. Vol. 373. 20140451. DOI: 10.1098/rsta.2014.0451.
- 5. The global methane budget 2000–2012 / M. Saunois, P. Bousquet, B. Poulter et al. // Earth System Science Data. 2016. Vol. 8. P. 697–751. DOI: 10.5194/essd-8-697-2016.
- A marine microbial consortium apparently mediating anaerobic oxidation methane / A. Boetius, K. Ravenschlag, C.J. Schubert, D. Rickert, F. Widdel, A. Gleseke, R. Amann, B.B. Jørgensen, U. Witte, O. Pfannkuche // Nature. – 2000. – Vol. 407. – P. 623–626. DOI: 10.1038/35036572.
- Ohfuji H., Rickard D. Experimental syntheses of framboids a review // Earth-Science Reviews. 2005. Vol. 71. P. 147–170. DOI: 10.1016/j.earscirev.2005.02.001.
- 8. Harmandas N.G., Navarro Fernandez E., Koutsoukos P.G. Crystal growth of pyrite in aqueous solutions. Inhibition by organophosphorus compounds // Langmuir. 1998. Vol. 14. P. 1250–1255. DOI: 10.1021/la970354c
- 9. Drachev S.S. Laptev Sea rifted continental margin: modern knowledge and unsolved questions // Polarforschung. 2000. Vol. 68. P. 41-50.
- Trace element content of sedimentary pyrite as a new proxy for deep-time ocean-atmosphere evolution / R.R. Large, J.A. Halpin, L.V. Danyushevsky, V.V. Maslennikov, S.W. Bull, J.A. Long, D.D. Gregory, E. Lounejeva, T.W. Lyons, P.J. Sack, P.J. McGoldrick, C.R. Calver // Earth and Planetary Science Letters. – 2014. – Vol. 389. – P. 209–220. DOI: 10.1016/j.epsl.2013.12.020.
- Trace elements in methane-seep carbonates: potentials, limitations, and perspectives / D. Smrzka, D. Feng, T. Himmler, J. Zwicker, Y. Hu, P. Monien, N. Tribovillard, D. Chen, J. Peckmann // Earth-Science Reviews. – 2020. – Vol. 208. – 103263. DOI: 10.1016/j.earscirev.2020.103263.
- 12. Huerta-Diaz M.A., Morse J.W. Pyritization of trace metals in anoxic marine sediments // Geochimica et Cosmochimica Acta. 1992. Vol. 56. P. 2681–2702.
- Geochemistry and mineralogy of sediments and authigenic carbonates from the Malta Plateau, Strait of Sicily (Central Mediterranean): relationships with mud/fluid release from a mud volcano system / M. Cangemi, R. Di Leonardo, A. Bellanca, A. Cundy, R. Neri, M. Angelone // Chemical Geology. – 2010. – Vol. 276. – P. 294–308. DOI: 10.1016/j.chemgeo.2010.06.014.
- Multistage sedimentary and metamorphic origin of pyrite and gold in the Giant Sukhoi log deposit, Lena Gold Province, Russia / R.R. Large, V.V. Maslennikov, F. Robert, L.V. Danyushevsky, Z. Chang // Economic Geology. – 2007. – Vol. 102. – P. 1233–1267. DOI: 10.2113/gsecongeo.102.7.1233.
- 15. Wang B., Lei H., Huang F. Impacts of sulfate-driven anaerobic oxidation of methane on the morphology, sulfur isotope, and trace element content of authigenic pyrite in marine sediments of the northern South China Sea // Marine and Petroleum Geology. 2022. Vol. 139. 105578. DOI: 10.1016/j.marpetgeo.2022.105578.

- 16. Geochemical signatures of intense episodic anaerobic oxidation of methane in near-surface sediments of a recently discovered cold seep (Kveithola trough, NW Barents Sea) / M. Bazzaro, N. Ogrinc, F. Relitti, R.G. Lucchi, M. Giani, G. Adami, E. Pavoni, C. De Vittor // Marine Geology. 2020. Vol. 425. 106189. DOI: 10.1016/j.margeo.2020.106189.
- 17. The enrichment of heavy iron isotopes in authigenic pyrite as a possible indicator of sulfate-driven anaerobic oxidation of methane: Insights from the South China Sea / Z. Lin, X. Sun, Y. Lu, H. Strauss, L. Xu, J. Gong, B.M.A. Teichert, R. Lu, H. Lu, W. Sun, J. Peckmann // Chemical Geology. 2017. Vol. 449. P. 15–29. DOI: 10.1016/j.chemgeo.2016.11.032.
- Geochemistry of deep sea sediments at cold seep sites in the Nankai Trough: Insights into the effect of anaerobic oxidation of methane / H. Sato, K.I. Hayashi, Y. Ogawa, K. Kawamura // Marine Geology. – 2012. – Vol. 323–325. – P. 47–55. DOI: 10.1016/j.margeo.2012.07.013.
- The impact of diffusive transport of methane on pore-water and sediment geochemistry constrained by authigenic enrichments of carbon, sulfur, and trace elements: A case study from the Shenhu area of the South China Sea / Y. Hu, D. Feng, J. Peckmann, S. Gong, Q. Liang, H. Wang, D. Chen // Chemical Geology. 2020. Vol. 553. 119805. DOI: 10.1016/j.chemgeo.2020.119805.
- 20. Effects of sulfate reduction processes on the trace element geochemistry of sedimentary pyrite in modern seep environments / Z. Lin, X. Sun, K. Chen, H. Strauss, R. Klemd, D. Smrzka, T. Chen, Y. Lu, J. Peckmann // Geochimica et Cosmochimica Acta. 2022. Vol. 333. P. 75–94. DOI: 10.1016/j.gca.2022.06.026.
- 21. Enrichment mechanism of trace elements in pyrite under methane seepage / X. Miao, X. Feng, J. Li, X. Liu, J. Liang, J. Feng, Q. Xiao, X. Dan, J. Wei // Geochemical Perspectives Letters. 2022. Vol. 21. P. 18–22. DOI: 10.7185/geochemlet.2211.
- 22. Coastal erosion vs riverine sediment discharge in the Arctic Shelf seas / V. Rachold, M.N. Grigoriev, F.E. Are, S. Solomon, E. Reimnitz, H. Kassens, M. Antonow // International Journal of Earth Sciences. 2000. Vol. 89. P. 450–460. DOI: 10.1007/s005310000113.
- 23. Natural and technogenic water and sediment supply to the Laptev Sea / A.M. Alabyan, R.S. Chalov, V.N. Korotaev, A.Y. Sidorchuk, A.A. Zaitsev // Berichte zur Polarforschung. 1995. Vol. 176. P. 265–271.
- 24. Драчев С.С. О тектонике фундамента шельфа моря Лаптевых // Геотектоника. 2002. Т. 34. С. 60-76.
- 25. Franke D., Hinz K., Oncken O. The Laptev Sea rift // Marine and Petroleum Geology. 2001. Vol. 18. P. 1083-1127. DOI: 10.1016/S0264-8172(01)00041-1.
- 26. Distribution of permafrost and gas hydrates in relation to intensive gas emission in the central part of the Laptev Sea (Russian Arctic) / V. Bogoyavlensky, A. Kishankov, A. Kazanin, G. Kazanin // Marine and Petroleum Geology. 2022. Vol. 138. 105527. DOI: 10.1016/j.marpetgeo.2022.105527.
- 27. Cold-seep carbonates of the Laptev Sea continental slope: Constraints from fluid sources and environment of formation / A. Ruban, M. Rudmin, A. Mazurov, D. Chernykh, O. Dudarev, I. Semiletov // Chemical Geology. 2022. Vol. 610. 121103. DOI: 10.1016/j.chemgeo.2022.121103
- Methane-derived authigenic carbonates on the seafloor of the Laptev Sea Shelf / M.D. Kravchishina, A.Y. Lein, M.V. Flint, B.V. Baranov, A.Y. Miroshnikov, E.O. Dubinina, O.M. Dara, A.G. Boev, A.S. Savvichev // Frontiers in Marine Science. – 2021. – Vol. 8. – 690304. DOI: 10.3389/fmars.2021.690304.
- 29. The formation of authigenic carbonates at a methane seep site in the northern part of the Laptev Sea / A. Ruban, M. Rudmin, O. Dudarev, A. Mazurov // Minerals. 2020. Vol. 10. P. 1–14. DOI: 10.3390/min10110948.
- 30. Влияние метановых сипов на морфологию аутигенного пирита в донных осадках континентального склона моря Лаптевых / А.С. Рубан, Я.В. Милевский, Д.В. Черных, Е.В. Гершелис, О.В. Дударев, А.В. Доманюк, И.П. Семилетов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333. – № 12. – С. 88–98. DOI: 0.18799/24131830/2022/12/3848.
- 31. Wilkin R.T., Barnes H.L., Brantley S.L. The size distribution of framboidal pyrite in modern sediments: an indicator of redox conditions // Geochimica and Cosmochimica Acta. 1996. Vol. 60. P. 3897–3912. DOI: 10.1016/0016-7037(96)00209-8.
- 32. Raiswell R., Berner R.A. Pyrite formation in euxinic and semi-euxinic sediments // American Journal of Science. 1985. Vol. 285. P. 710-724. DOI: 10.2475/AJS.285.8.710.
- 33. Rickard D. Sedimentary pyrite framboid size-frequency distributions: a meta-analysis // Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoccology. 2019. Vol. 522. P. 62–75. DOI: 10.1016/j.palaeo.2019.03.010.
- 34. Enhanced framboidal pyrite formation related to anaerobic oxidation of methane in the sulfate-methane transition zone of the northern South China Sea / Q. Lin, J. Wang, T.J Algeo, F. Sun, R. Lin // Marine Geology. 2016. Vol. 379. P. 100–108. DOI: 10.1016/j.margeo.2016.05.016.
- 35. Effects of methane seepage activity on the morphology and geochemistry of authigenic pyrite / X. Miao, X. Feng, X. Liu, J. Li, J. Wei // Marine and Petroleum Geology. 2021. Vol. 133. 105231. DOI: 10.1016/j.marpetgeo.2021.105231.
- 36. Free hydrocarbon gas, gas hydrate, and authigenic minerals in chemosynthetic communities of the northern Gulf of Mexico continental slope: relation to microbial processes / R. Sassen, H.H. Roberts, R. Carney, A.V. Milkov, D.A. DeFreitas, B. Lanoil, C. Zhang // Chemical Geology. 2004. Vol. 205. P. 195–217. DOI: 10.1016/j.chemgeo.2003.12.032.
- Taylor K.G., Macquaker J.H.S. Iron minerals in marine sediments record chemical environments // Elements. 2011. Vol. 7. P. 113–118. DOI: 10.2113/gselements.7.2.113.
- 38. The influence of cold seepage on the grain size and geochemistry of sediments from the Laptev Sea shelf / A. Ruban, T. Tesi, E. Yaroshchuk, D. Kosmach, M. Rudmin, E. Gershelis, O. Dudarev, A. Mazurov, I. Semiletov // Marine and Petroleum Geology. 2024. Vol. 160. 106638. DOI: 10.1016/j.marpetgeo.2023.106638.
- 39. Kvenvolden K.A. Gas hydrates geological perspective and global change // Reviews of Geophysics. 1993. Vol. 31. P. 173–187. DOI: 10.1029/93RG00268.
- Trace element content of sedimentary pyrite in black shales / D.D. Gregory, R.R. Large, J.A. Halpin, E.L. Baturina, T.W. Lyons, S. Wu, L. Danyushevsky, P.J. Sack, A. Chappaz, V.V. Maslennikov, S.W. Bull // Economic Geology. – 2015. – Vol. 110. – P. 1389–1410. DOI: 10.2113/econgeo.110.6.1389.

- Trace metals as paleoredox and paleoproductivity proxies: an update / N. Tribovillard, T.J. Algeo, T. Lyons, A. Riboulleau // Chemical Geology. – 2006. – Vol. 232. – P. 12–32. DOI: 10.1016/j.chemgeo.2006.02.012.
- Rickard D. Metal sequestration by sedimentary iron sulfides // Sulfidic sediments and sedimentary rocks / Ed. by D. Rickard. New York: Elsevier, 2012. – P. 287–317.
- Sedimentary pyrite proxy for atmospheric oxygen: evaluation of strengths and limitations / R. Large, I. Mukherjee, L. Danyushevsky, D. Gregory, J. Steadman, R. Corkrey // Earth-Science Reviews. – 2022. – Vol. 227. – 103941. DOI: 10.1016/j.earscirev.2022.103941.
- 44. Seep dynamics as revealed by authigenic carbonates from the eastern Qiongdongnan Basin, South China Sea / Y. Liu, J. Wei, Y. Li, J. Chang, X. Miao, H. Lu // Marine and Petroleum Geology. – 2022. – Vol. 142. – 105736. DOI: 10.1016/j.marpetgeo.2022.105736.
- 45. Scott C., Lyons T.W. Contrasting molybdenum cycling and isotopic properties in euxinic versus non-euxinic sediments and sedimentary rocks: refining the paleoproxies // Chemical Geology. 2012. Vol. 324–325. P. 19–27. DOI: 10.1016/j.chemgeo.2012.05.012
- Gregory D., Meffre S., Large R. Comparison of metal enrichment in pyrite framboids from a metal-enriched and metal-poor Estuary // American Mineralogist. – 2014. – Vol. 99. – P. 633–644. DOI: 10.2138/am.2014.4545.
- 47. Geochemistry of cold seepage-impacted sediments: Per-ascensum or per-descensum trace metal enrichment? / N. Tribovillard, E.A. du Châtelet, A. Gay, F. Barbecot, P. Sansjofre, J.L. Potdevin // Chemical Geology. – 2013. – Vol. 340. – P. 1–12. DOI: 10.1016/j.chemgeo.2012.12.012.
- Trace element signatures in sedimentary pyrite as indicators of methane seepage activities / X. Yu, X. Miao, D. Oppo, H. Guan, J. Wei, J. Li, T. Wu // Marine and Petroleum Geology. – 2025. – Vol. 173. – 107290. DOI: 10.1016/j.marpetgeo.2025.107290.

# Информация об авторах

Алексей Сергеевич Рубан, кандидат геолого-минералогических наук, доцент отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30; ruban@tpu.ru; https://orcid.org/0000-0001-5852-8201

**Максим Андреевич Рудмин**, кандидат геолого-минералогических наук, доцент отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30; rudminma@tpu.ru; https://orcid.org/0000-0002-9004-9929

**Олег Викторович Дударев**, доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник лаборатории арктических исследований, Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, Россия, 690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, 43; dudarev@poi.dvo.ru

**Игорь Петрович Семилетов**, член-корреспондент РАН, доктор географических наук, заведующий лабораторией арктических исследований, Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, Россия, 690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, 43, ipsemiletov@gmail.com; https://orcid.org/0000-0003-1741-6734

Поступила в редакцию: 13.03.2025 Поступила после рецензирования: 24.03.2025

Принята к публикации: 10.04.2025

#### REFERENCES

- 1. Rickard D., Mussmann M., Steadman J.A. Sedimentary sulfides. *Elements*, 2017, vol. 13, pp. 117–122. DOI: 10.2113/gselements.13.2.117.
- 2. Berner R.A. Sedimentary pyrite formation: an update. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1984, vol. 48, pp. 605–615. DOI: 10.1016/0016-7037(84)90089-9.
- 3. Sun T., Cao K., Yin P., Jiang X., Tian Y. Authigenic pyrite and gypsum minerals in offshore Zhoushan sediments: morphology, formation, and environmental implications. *Frontiers in Earth Science*, 2023, vol. 11, pp. 1–13. DOI: 10.3389/feart.2023.1165809.
- 4. Shakhova N., Semiletov I., Sergienko V., Lobkovsky L., Yusupov V., Salyuk A., Salomatin A., Chernykh D., Kosmach D., Panteleev G., Nicolsky D., Samarkin V., Joye S., Charkin A., Dudarev O., Meluzov A., Gustafsson O. The East Siberian Arctic Shelf: towards further assessment of permafrost-related methane fluxes and role of sea ice. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2015, vol. 373, 20140451. DOI: 10.1098/rsta.2014.0451.
- 5. Saunois M., Bousquet P., Poulter B. The global methane budget 2000–2012. *Earth System Science Data*, vol. 8, pp. 697–751. DOI: 10.5194/essd-8-697-2016.
- Boetius A., Ravenschlag K., Schubert C.J., Rickert D., Widdel F., Gleseke A., Amann R., Jørgensen B.B., Witte U., Pfannkuche O. A marine microbial consortium apparently mediating anaerobic oxidation methane. *Nature*, 2000, vol. 407, pp. 623–626. DOI: 10.1038/35036572.
- 7. Ohfuji H., Rickard D. Experimental syntheses of framboids a review. *Earth-Science Reviews*, 2025, vol. 71, pp. 147–170. DOI: 10.1016/j.earscirev.2005.02.001.
- 8. Harmandas N.G., Navarro Fernandez E., Koutsoukos P.G. Crystal growth of pyrite in aqueous solutions. Inhibition by organophosphorus compounds. *Langmuir*, 1998, vol. 14, pp. 1250–1255. DOI: 10.1021/la970354c.

- Drachev S.S. Laptev Sea rifted continental margin: modern knowledge and unsolved questions. *Polarforschung*, 2000, vol. 68, pp. 41–50.
- Large R.R., Halpin J.A., Danyushevsky L.V., Maslennikov V.V., Bull S.W., Long J.A., Gregory D.D., Lounejeva E., Lyons T.W., Sack P.J., McGoldrick P.J., Calver C.R. Trace element content of sedimentary pyrite as a new proxy for deep-time ocean-atmosphere evolution. *Earth and Planetary Science Letters*, 2014, vol. 389, pp. 209–220. DOI: 10.1016/j.epsl.2013.12.020.
- Smrzka D., Feng D., Himmler T., Zwicker J., Hu Y., Monien P., Tribovillard N., Chen D., Peckmann J. Trace elements in methane-seep carbonates: potentials, limitations, and perspectives. *Earth-Science Reviews*, 2020, vol. 208, 103263, DOI: 10.1016/j.earscirev.2020.103263.
- 12. Huerta-Diaz M.A., Morse J.W. Pyritization of trace metals in anoxic marine sediments. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1992, vol. 56, pp. 2681–2702. DOI: 10.1016/0016-7037(92)90353-K.
- 13. Cangemi M., Di Leonardo R., Bellanca A., Cundy A., Neri R., Angelone M. Geochemistry and mineralogy of sediments and authigenic carbonates from the Malta Plateau, Strait of Sicily (Central Mediterranean): Relationships with mud/fluid release from a mud volcano system. *Chemical Geology*, 2010, vol. 276, pp. 294–308. DOI: 10.1016/j.chemgeo.2010.06.014.
- Large R.R., Maslennikov V.V., Robert F., Danyushevsky L.V., Chang Z. Multistage sedimentary and metamorphic origin of pyrite and gold in the Giant Sukhoi log deposit, Lena Gold Province, Russia. *Economic Geology*, 2007, vol. 102, pp. 1233–1267. DOI: 10.2113/gsecongeo.102.7.1233.
- 15. Wang B., Lei H., Huang F. Impacts of sulfate-driven anaerobic oxidation of methane on the morphology, sulfur isotope, and trace element content of authigenic pyrite in marine sediments of the northern South China Sea. *Marine and Petroleum Geology*, 2022, vol. 139, 105578. DOI: 10.1016/j.marpetgeo.2022.105578.
- 16. Bazzaro M., Ogrinc N., Relitti F., Lucchi R.G., Giani M., Adami G., Pavoni E., De Vittor C. Geochemical signatures of intense episodic anaerobic oxidation of methane in near-surface sediments of a recently discovered cold seep (Kveithola trough, NW Barents Sea). *Marine Geology*, vol. 425, 106189. DOI: 10.1016/j.margeo.2020.106189.
- 17. Lin Z., Sun X., Lu Y., Strauss H., Xu L., Gong J., Teichert B.M.A., Lu R., Lu H., Sun W., Peckmann J. The enrichment of heavy iron isotopes in authigenic pyrite as a possible indicator of sulfate-driven anaerobic oxidation of methane: Insights from the South China Sea. *Chemical Geology*, 2017, vol. 449, pp. 15–29. DOI: 10.1016/j.chemgeo.2016.11.032.
- Sato H., Hayashi K.I., Ogawa Y., Kawamura K. Geochemistry of deep sea sediments at cold seep sites in the Nankai Trough: insights into the effect of anaerobic oxidation of methane. *Marine Geology*, 2012, vol. 323–325, pp. 47–55. DOI: 10.1016/j.margeo.2012.07.013.
- 19. Hu Y., Feng D., Peckmann J., Gong S., Liang Q., Wang H., Chen D. The impact of diffusive transport of methane on pore-water and sediment geochemistry constrained by authigenic enrichments of carbon, sulfur, and trace elements: A case study from the Shenhu area of the South China Sea. *Chemical Geology*, 2020, vol. 553, 119805. DOI: 10.1016/j.chemgeo.2020.119805.
- Lin Z., Sun X., Chen K., Strauss H., Klemd R., Smrzka D., Chen T., Lu Y., Peckmann J. Effects of sulfate reduction processes on the trace element geochemistry of sedimentary pyrite in modern seep environments. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2022, vol. 333, pp. 75–94. DOI: 10.1016/j.gca.2022.06.026.
- Miao X., Feng X., Li J., Liu X., Liang J., Feng J., Xiao Q., Dan X., Wei J. Enrichment mechanism of trace elements in pyrite under methane seepage. *Geochemical Perspectives Letters*, 2022, vol. 21, pp. 18–22. DOI: 10.7185/geochemlet.2211.
- Rachold V., Grigoriev M.N., Are F.E., Solomon S., Reimnitz E., Kassens H., Antonow M. Coastal erosion vs riverine sediment discharge in the Arctic Shelf seas. *International Journal of Earth Sciences*, 2000, vol. 89, pp. 450–460. DOI: 10.1007/s005310000113.
- 23. Alabyan A.M., Chalov R.S., Korotaev V.N., Sidorchuk A.Y., Zaitsev A.A. Natural and technogenic water and sediment supply to the Laptev Sea. *Berichte zur Polarforschung*, 1995, vol. 176, pp. 265–271.
- 24. Drachev S.S. On the basement tectonics of the Laptev Sea shelf. Geotectonics, 2002, vol. 34, pp. 60-76. (In Russ.)
- 25. Franke D., Hinz K., Oncken O. The Laptev Sea rift. Marine and Petroleum Geology, 2001, vol. 18, pp. 1083–1127. DOI: 10.1016/S0264-8172(01)00041-1.
- 26. Bogoyavlensky V., Kishankov A., Kazanin A., Kazanin G. Distribution of permafrost and gas hydrates in relation to intensive gas emission in the central part of the Laptev Sea (Russian Arctic). *Marine and Petroleum Geology*, 2022, vol. 138, 105527. DOI: 10.1016/j.marpetgeo.2022.105527.
- Ruban A., Rudmin M., Mazurov A., Chernykh D., Dudarev O., Semiletov I. Cold-seep carbonates of the Laptev Sea continental slope: Constraints from fluid sources and environment of formation. *Chemical Geology*, 2022, vol. 610, 121103. DOI: 10.1016/j.chemgeo.2022.121103.
- Kravchishina M.D., Lein A.Y., Flint M. V, Baranov B. V, Miroshnikov A.Y., Dubinina E.O., Dara O.M., Boev A.G., Savvichev A.S. Methane-derived authigenic carbonates on the seafloor of the Laptev Sea Shelf. *Frontiers in Marine Science*, 2021, vol. 8, 690304. DOI: 10.3389/fmars.2021.690304.
- 29. Ruban A., Rudmin M., Dudarev O., Mazurov A. The formation of authigenic carbonates at a methane seep site in the northern part of the Laptev Sea. *Minerals*, 2020, vol. 10, 948. DOI: 10.3390/min10110948.
- 30. Ruban A.S., Milevsky Ya.V., Chernykh D.V., Gershelis E.V., Dudarev O.V., Domanyuk A.V., Semiletov I.P. Methane seepage impact on authigenic pyrite morphology in sediments of the Laptev Sea continental slope. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, no. 12, pp. 88–98. (In Russ.) DOI: 10.18799/24131830/2022/12/3848.
- 31. Wilkin R.T., Barnes H.L., Brantley S.L. The size distribution of framboidal pyrite in modern sediments: an indicator of redox conditions. *Geochimica and Cosmochimica Acta*, 1996, vol. 60, pp. 3897–3912. DOI: 10.1016/0016-7037(96)00209-8.
- 32. Raiswell R., Berner R.A. Pyrite formation in euxinic and semi-euxinic sediments. *American Journal of Science*, 1985, vol. 285, pp. 710–724. DOI: 10.2475/AJS.285.8.710.
- 33. Rickard. D Sedimentary pyrite framboid size-frequency distributions: a meta-analysis. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2019, vol. 522, pp. 62–75. DOI: 10.1016/j.palaeo.2019.03.010.

- 34. Lin Q., Wang J., Algeo T.J., Sun F., Lin R. Enhanced framboidal pyrite formation related to anaerobic oxidation of methane in the sulfate-methane transition zone of the northern South China Sea. *Marine Geology*, 2016, vol. 379, pp. 100–108. DOI: 10.1016/j.margeo.2016.05.016.
- 35. Miao X., Feng X., Liu X., Li J., Wei J. Effects of methane seepage activity on the morphology and geochemistry of authigenic pyrite. *Marine and Petroleum Geology*, 2021, vol, 133, 105231. DOI: 10.1016/j.marpetgeo.2021.105231.
- 36. Sassen R., Roberts H.H., Carney R., Milkov A.V., DeFreitas D.A., Lanoil B., Zhang C. Free hydrocarbon gas, gas hydrate, and authigenic minerals in chemosynthetic communities of the northern Gulf of Mexico continental slope: Relation to microbial processes. *Chemical Geology*, 2004, vol. 205, pp. 195–217. DOI: 10.1016/j.chemgeo.2003.12.032.
- 37. Taylor K.G., Macquaker J.H.S. Iron minerals in marine sediments record chemical environments. *Elements*, 2011, vol. 7, pp. 113–118. DOI: 10.2113/GSELEMENTS.7.2.113.
- Ruban A., Tesi T., Yaroshchuk E., Kosmach D., Rudmin M., Gershelis E., Dudarev O., Mazurov A., Semiletov I. The influence of cold seepage on the grain size and geochemistry of sediments from the Laptev Sea shelf. *Marine and Petroleum Geology*, 2024, vol. 160, 106638. DOI: 10.1016/j.marpetgeo.2023.106638.
- 39. Kvenvolden K.A. Gas hydrates geological perspective and global change. *Reviews of Geophysics*, 2020, vol. 31, pp. 173–187. DOI: 10.1029/93RG00268.
- 40. Gregory D.D., Large R.R., Halpin J.A., Baturina E.L., Lyons T.W., Wu S., Danyushevsky L., Sack P.J., Chappaz A., Maslennikov V.V., Bull S.W. Trace element content of sedimentary pyrite in black shales. *Economic Geology*, 2015, vol. 110, pp. 1389–1410. DOI: 10.2113/econgeo.110.6.1389.
- 41. Tribovillard N., Algeo T.J., Lyons T., Riboulleau A. Trace metals as paleoredox and paleoproductivity proxies: An update. *Chemical Geology*, vol. 232, pp. 12–32. DOI: 10.1016/j.chemgeo.2006.02.012.
- 42. Rickard D. Metal sequestration by sedimentary iron sulfides. *Sulfidic sediments and sedimentary rocks*. Ed. by D. Rickard. New York, Elsevier, 2012. pp 287–317.
- 43. Large R., Mukherjee I., Danyushevsky L., Gregory D., Steadman J., Corkrey R. Sedimentary pyrite proxy for atmospheric oxygen: evaluation of strengths and limitations. *Earth-Science Reviews*, 2022, vol. 227, 103941. DOI: 10.1016/j.earscirev.2022.103941.
- 44. Liu Y., Wei J., Li Y., Chang J., Miao X., Lu H. Seep dynamics as revealed by authigenic carbonates from the eastern Qiongdongnan Basin, South China Sea. *Marine and Petroleum Geology*, 2022, vol. 142, 105736. DOI: 10.1016/j.marpetgeo.2022.105736.
- 45. Scott C., Lyons T.W. Contrasting molybdenum cycling and isotopic properties in euxinic versus non-euxinic sediments and sedimentary rocks: Refining the paleoproxies. *Chemical Geology*, 2012, vol. 324–325, pp. 19–27. DOI: 10.1016/j.chemgeo.2012.05.012.
- 46. Gregory D., Meffre S., Large R. Comparison of metal enrichment in pyrite framboids from a metal-enriched and metal-poor Estuary. *American Mineralogist*, 2014, vol. 99, pp. 633–644. DOI: 10.2138/am.2014.4545.
- 47. Tribovillard N., Du Châtelet E.A., Gay A., Barbecot F., Sansjofre P., Potdevin J.L. Geochemistry of cold seepage-impacted sediments: per-ascensum or per-descensum trace metal enrichment? *Chemical Geology*, 2013, vol. 340, pp. 1–12. DOI: 10.1016/j.chemgeo.2012.12.012.
- 48. Yu X., Miao X., Oppo D., Guan H., Wei J., Li J., Wu T. Trace element signatures in sedimentary pyrite as indicators of methane seepage activities. *Marine and Petroleum Geology*, 2025, vol. 173, 107290. DOI: 10.1016/j.marpetgeo.2025.107290

# Information about the authors

**Alexey S. Ruban**, Cand. Sc., Associate Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation; ruban@tpu.ru; https://orcid.org/0000-0001-5852-8201

**Maxim A. Rudmin**, Cand. Sc., Associate Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation; rudminma@tpu.ru; https://orcid.org/0000-0002-9004-9929

**Oleg V. Dudarev**, Dr. Sc., Chief Researcher, Russian Academy of Sciences, Pacific Oceanological Institute, 43, Baltiiskaya street, Vladivostok, 690041, Russian Federation; dudarev@poi.dvo.ru

**Igor P. Semiletov**, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Dr. Sc., Professor, Head of the Laboratory of Arctic Research, Russian Academy of Sciences, Pacific Oceanological Institute, 43, Baltiiskaya street, Vladivostok, 690041, Russian Federation; ipsemiletov@gmail.com; https://orcid.org/0000-0003-1741-6734

Received: 13.03.2025 Revised: 24.03.2025 Accepted: 10.04.2025 УДК 681.5 DOI: 10.18799/24131830/2025/5/4734 Шифр специальности ВАК: 2.8.4 Научная статья

# Разработка методики уравновешивания балансирного станка-качалки с роторными противовесами и определение ее работоспособности в ходе натурного эксперимента

# Е.М. Солодкий<sup>⊠</sup>, А.Б. Петроченков, С.Н. Кривощеков, С.В. Сальников, Д.Д. Вишняков, Р.Ю. Юдин

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Россия, г. Пермь

<sup>™</sup>wsdl00@gmail.com

Аннотация. Актуальность исследования заключается в необходимости повышения энергоэффективности эксплуатации нефтедобывающих скважин штанговыми глубинными установками. Учитывая тенденцию ежегодного роста средней обводненности продукции нефтедобывающих скважин, роста доли трудноизвлекаемых запасов и осложненного фонда, практическое внедрение методов снижения эксплуатационных затрат является важнейшей задачей современного нефтяного промысла России. В этом аспекте интеллектуализация систем управления, обработки информации и систем мониторинга позволяет повысить энергетическую эффективность отдельных элементов установки без изменения технологических параметров работы установки в целом. Отдельными элементами процесса оптимизации могут выступать электропривод и его системы управления, и кинематические величины станкакачалки. При этом трудно представить внедрение новых решений в кинематике балансирного станка-качалки, отличающихся от общепринятых. С точки зрения системы управления электроприводом существуют ограниченные возможности повышения энергоэффективности, что обуславливается узким диапазоном регулирования скорости. С другой стороны, параметры роторного противовеса значительно влияют на потребляемую электроприводом активную электрическую мощность. Таким образом, разработка алгоритмического обеспечения интеллектуальных станций управления штанговыми глубинными установками является актуальной задачей. Цель: формирование авторской методики уравновешивания балансирного станка-качалки с роторным противовесом и проверка ее работоспособности в лабораторных условиях. Методы исследования основаны на использовании положений современной теории управления, теории автоматизированного электропривода, теории оптимизации, а также методов имитационного моделирования. Результаты. Предложена авторская методика нахождения оптимального уравновешивания станка-качалки. Осуществлен теоретический расчет оптимального уравновешивания для целевой нефтедобывающей скважины Уньвинского нефтяного месторождения, проведено натурное моделирование данного процесса на специально разработанном на базе Пермского национального исследовательского политехнического университета испытательном стенде. В результате проверки работоспособности разработанной методики на испытательном стенде зафиксировано снижение среднеквадратичного значения крутящего момента на 10,32 % за цикл качания и снижение потребления активной энергии на 7,15 %. Выводы. Практическое применение разработанного алгоритма позволит достичь значительного снижения потребляемой электроэнергии станком-качалкой. Разработанный алгоритм может быть реализован в качестве функции преобразователя частоты приводного электродвигателя штанговой скважинной насосной установки.

**Ключевые слова:** управление приводом, энергоэффективность, оптимизация работы станка-качалки, добыча нефти, асинхронный двигатель

**Благодарности:** Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FSNM-2023-0005).

Для цитирования: Разработка методики уравновешивания балансирного станка-качалки с роторными противовесами и определение ее работоспособности в ходе натурного эксперимента / Е.М. Солодкий, А.Б. Петроченков, С.Н. Кривощеков, С.В. Сальников, Д.Д. Вишняков, Р.Ю. Юдин // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 5. – С. 174–182. DOI: 10.18799/24131830/2025/5/4734 UDC 681.5 DOI: 10.18799/24131830/2025/5/4734 Scientific paper

# Development of a technique for balancing a rocking machine with rotary counterweights and determination of its operability during a field experiment

# E.M. Solodky<sup>⊠</sup>, A.B. Petrochenkov, S.N. Krivoshchekov, S.V. Salnikov, D.D. Vishnyakov, R.Yu. Yudin

# Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

<sup>™</sup>wsdl00@gmail.com

Abstract. Relevance. The need to improve the energy efficiency of oil production wells operation by rod deep installations. Taking into account the trend of annual growth in the average water content of oil production wells, an increase in the share of hard-to-recover reserves and a complicated fund, the practical implementation of methods to reduce operating costs is the most important task of the modern Russian oil industry. In this aspect, intellectualization of control systems, information processing and monitoring systems allow increasing the energy efficiency of individual elements of the unit, without changing the technological parameters of the unit as a whole. The electric drive and its control systems and kinematic values of the pumpjack can be considered as separate elements of optimization. It is difficult to imagine applying of new solutions in the kinematics of the pump unit that differ from the generally accepted ones. Considering the drive control system, there are limited opportunities to improve energy efficiency, because of limited speed control range. On the other hand, the parameters of the rotor counterweight significantly affect the active electric power consumed by the electric drive. Thus, the development of algorithmic solutions for intelligent control stations of pump units becomes an issue of the day. *Aim.* To form the author's methodology for balancing a rocking machine with a rotary counterweight and checking its operability in laboratory conditions. Methods. Research methods are based on the use of the provisions of modern control theory, automated electric drive theory, optimization theory, and simulation methods. *Results.* The authors have proposed the method of finding the optimal balancing of the rocking machine. The authors carried out the theoretical calculation of the optimal balancing for the target oil well of the Unvinskoe oil field and a full-scale simulation of this process on a test bench specially developed on the basis of Perm National Research Polytechnic University. As a result of checking the operability of the developed technique, a decrease in the root mean square torque value by 10.32% per swing cycle and a decrease in active energy consumption by 7.15% were recorded on the test bench. *Conclusion*. The practical application of the developed algorithm will allow achieving a significant reduction in the power consumption of the rocking machine. The developed algorithm can be implemented as a function of a frequency converter of a drive electric motor of a rod borehole pumping unit.

Keywords: drive control, energy efficiency, optimization of the rocking machine operation, oil production, induction motor

**Acknowledgements:** The research was funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project No. FSNM-2023-0005).

**For citation:** Solodky E.M., Petrochenkov A.B., Krivoshchekov S.N., Salnikov S.V., Vishnyakov D.D., Yudin R.Yu. Development of a technique for balancing a rocking machine with rotary counterweights and determination of its operability during a field experiment. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 5, pp. 174–182. DOI: 10.18799/24131830/2025/5/4734

# Введение

На сегодняшний день по результатам анализа эксплуатационного фонда скважин ООО «ЛУКОЙЛ-ПЕРМЬ» (активы на территории Пермского края) 65,9 % нефтедобывающих скважин эксплуатируются штанговыми скважинными насосными установками, а 31,3 % скважин – установками электроцентробежных насосов.

Вместе с широким распространением данного способа добычи остро стоит вопрос об энергоэф-

фективности процесса. В связи с динамичным развитием микропроцессорных систем управления электроприводом и преобразовательной техники все большее внимание уделяется вопросам энергоэффективности электропривода, в том числе электропривода в составе штанговой скважинной насосной установки (ШСНУ) [1–4]. В настоящее время актуальными стали вопросы оптимизации режимов работы и настройки систем управления электроприводом отдельного балансирного станка-

качалки (СК). При таком подходе скорость откачки нефтяной жидкости стараются не менять, а энергетическая эффективность достигается настройкой контуров систем управления электроприводом [5, 6], а также внутрицикловым реагированием скорости [7] для снижения нагрузок на полированном штоке и в элементах четырехзвенного механизма СК [8, 9]. Оптимальное уравновешивание СК является одним из возможных способов повышения эффективности работы установки за счет снижения циклового потребления электроэнергии. В промышленной практике, как правило, процессу уравновешивания не уделяют должного внимания. Существует ряд методов обеспечения уравновешивания СК с целью повышения энергетической эффективности работы установки. Такие методы позволяют достичь снижения удельного электропотребление в среднем на 4-21 % [10]. Большая часть таких методов сопряжена с анализом ваттметрграмм и профилей тока, который не формулирует четкого критерия для минимизации целевой функции энергопотребления за цикл качания [11, 12]. В данной работе предлагается сформулировать методику уравновешивания балансирного СК с роторными противовесами, обеспечивающую минимизацию целевой функции энергопотребления.

#### Объекты и методика исследования

Для оптимизации электропотребления электропривода СК целесообразно ограничиться рассмотрением одного цикла качания. При этом активная энергия *W*, потребляемая из сети за цикл качания, может быть определена по формуле (1):

$$W = \int_{0}^{2\pi} \frac{T_{L}(\theta)\omega(\theta)}{\eta(\theta)} d\theta,$$
 (1)

где  $\theta$  – угол кривошипа, рад;  $T_L(\theta)$  – нагрузочный момент на валу двигателя, Нм;  $\omega(\theta)$  – угловая скорость ротора, рад/с;  $\eta(\theta)$  – КПД двигателя, о. е.

Коэффициент полезного действия двигателя зависит от соотношения  $\frac{P_2}{P_{2\text{HOM}}}$ , где  $P_{2\text{HOM}}$  – номинальная мощность, Вт;  $P_2$  – механическая мощность на валу, Вт, которая завит от скорости вала электродвигателя и нагрузочного момента, который определяется как (2):

$$T_{L}(\theta) = T_{\omega} + \frac{T_{G}(\theta)}{i}, \qquad (2)$$

где *i* – передаточное число двухступенчатого редуктора;  $T_{\omega}$  – момент холостого хода редуктора, Нм;  $T_G(\theta)$  – момент на выходном валу редуктора от действия тангенциального усилия  $F_t(\theta)$  на пальце кривошипа, Н.

Приводной двигатель СК испытывает на себе значительные знакопеременные нагрузки. В этих условиях оценка КПД затруднена ввиду характера нагрузочного момента. Полагая что среднее значение КПД до и после уравновешивания изменяется несущественным образом, а впоследствии данная величина может быть уточнена средствами имитационного моделирования, а также при допущении о том, что угловая скорость электродвигателя меняется незначительно, энергопотребление установки будет определятся профилем нагрузочного момента. С учетом введённых допущений минимум активной мощности, потребляемой из сети за цикл качения, обеспечивается минимизацией следующего критерия:

$$I(T_{\text{MAX}}) = (T_L(\theta) + T_{\text{MAX}}\sin(\theta))^2, \qquad (3)$$

где  $T_{\text{MAX}}$  – максимальный момент роторного противовеса, Нм.

Оптимизация с выбранным критерием предполагает нахождение оптимального момента от роторного противовеса. Методика предложенного оптимального уравновешивания заключается в следующей алгоритмической последовательности:

- наблюдение электромагнитного момента двигателя;
- 2) оценка углового положения кривошипа  $\theta$ ;
- 3) поиск *Т*<sub>МАХ</sub> момента роторного противовеса.

Угловое положение кривошипа априори неизвестно ввиду отсутствия датчиков. Для наблюдения данного угла предлагается оригинальная методика, которая заключается в анализе электромагнитного момента приводного двигателя и его составляющей: а именно момента от усилия на полированном штоке  $T_L(\theta)$ . Поиск  $T_L(\theta)$  сопряжен с анализом кинематики станка качалки, а значит, требует знания основных кинематических соотношений СК.

Для примера рассмотрим кинематическую схему балансирного СК (СК 8-3,5-4000) как четырехзвенного механизма, который состоит из приводного двигателя, ременной передачи, редуктора и кривошипного механизма. Упрощенная кинематическая схема установки и ее параметры представлены на рис. 1 и в таблице, соответственно.

Необходимые для расчета четырехзвенного механизма СК величины могут быть получены из уравнений (4)–(11), в которые входят кинематические параметры станка (рис. 2).

$$\alpha = \varphi - \theta + \beta + \psi, \qquad (4)$$

$$\varphi = \frac{\pi}{2} - \arctan\left(\frac{l_2}{l_1}\right),\tag{5}$$

$$\Psi = \begin{cases} \varepsilon - \xi, & \sin(\theta - \phi) \ge 0\\ \varepsilon + \xi, & \sin(\theta - \phi) < 0 \end{cases}$$
(6)

$$B = a\cos(\frac{C^2 + B^2 - J^2}{2CB}),$$
 (7)

ſ

Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2025. Т. 336. № 5. С. 174–182 Солодкий Е.М. и др. Разработка методики уравновешивания балансирного станка-качалки с роторными ...

Tuble: Turumeters of the roe				
Парамотр	Обозначе-	Величина/		
Daramotor	ние	Размерность		
i arailleter	Designation	Value/Dimension		
Длина хода полированного штока	D	1 м/m		
Stroke length of the polished rod	D			
Длина шатуна	B	3 w/m		
Connecting rod length	Б	5 M/III		
Длина переднего плеча балансира		3,5 м/m		
Length of the front shoulder of the	Α			
balancer				
Длина заднего плеча балансира				
Length of the rear arm	С	2,5 м/m		
of the balancer				
Наибольший радиус кривошипа	D	$0.74  \mathrm{m}/\mathrm{m}$		
Largest crank radius	Λ	0,74 M/III		
Расстояние между осью опоры				
балансира и осью ведомого вала				
редуктора по горизонтали	L	2,195 м/m		
Horizontal distance between the axis	11			
of the balancer support and the axis				
of the driven shaft of the gearbox				
Расстояние между осью опоры				
балансира и осью ведомого вала		3 м/т		
редуктора по вертикали	la la			
Vertical distance between the axis of	12			
the balancer support and the axis of				
the driven shaft of the gearbox				
Максимальный момент				
роторного противовеса	<i>M</i>	36 кНм/kNm		
Maximum torque	1+1 CW			
of the rotary counterweight				
Конструктивная		2350 кг/kg		
неуравновешенность	FCU			
Constructive imbalance				
Передаточное число		5,3 отн. ед. relative units		
ремённой передачи	$i_1$			
Belt drive ratio				
Передаточное число редуктора	ia	37,18 отн. ед.		
Gear ratio of the gearbox	12	relative units		

Таблица.	Параметры станка качалки СК 8 3,5-4000
Table.	Parameters of the rockina machine SK 8 3.5-4000



 $\varepsilon = a\cos(\frac{C^2 + J^2 - B^2}{2CJ}), \qquad (8)$ 

$$\xi = a\cos(\frac{K^2 + J^2 - R^2}{2KJ}),$$
(9)

$$J = \sqrt{K^2 + R^2 - 2KR\cos(\theta - \phi)}, \qquad (10)$$

$$K = \sqrt{L_1^2 + L_2^2} , \qquad (11)$$

где  $\varphi$ , K – кинематические константы, представленные на упрощенной схеме (рис. 1);  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\psi$ ,  $\varepsilon$ ,  $\xi$ , J – кинематические переменные, представленные на упрощенной схеме (рис. 1); R, C, B,  $l_1$ ,  $l_2$  – параметры СК, используемые в вычислениях (таблица);  $\theta$  – угол положения кривошипа, рад. Расчет угловых переменных и констант производится в радианах, переменных и констант расстояний – в метрах.

Момент на выходном валу редуктора, в свою очередь, определяется следующим выражением (12):

$$T_C = T_\lambda + T_{cw} + T_{J\Sigma}, \qquad (12)$$

где  $T_{\lambda}$  – крутящий момент, обусловленный силой, приложенной в точке подвеса колонны штанг, Нм;  $T_{cw}$  – момент противовеса, Нм;  $T_{cw}=T_MR\sin(\theta)$ ;  $T_M$  – максимальный момент противовеса, Нм;  $T_{J\Sigma}$  – суммарный момент инерции, Нм, принимая во внимание, что скорость вращения двигателя изменяется незначительно  $T_{J\Sigma}=0$ .

Величина  $T_{\lambda}$  определяется усилием в точке подвеса колонны штанг  $F_{\lambda}$  (13), конструктивной неуравновешенностью  $F_{CU}$ , кинематикой СК и кинематической переменной  $k(\theta)(14)$ :

$$T_{\lambda} = k(\theta)(F_{\lambda} - F_{CU}), \qquad (13)$$

$$k(\theta) = \frac{RA}{C} \frac{\sin \alpha(\theta)}{\sin \beta(\theta)}.$$
 (14)

Так как в промысловых условиях момент нагрузки на валу двигателя не может быть определен путем прямого измерения, его оценка производиться с помощью наблюдателя электромагнитного момента [13–16], основанного на статорной электромагнитной модели двигателя (15) (рис. 2).

$$\begin{cases} \frac{d\psi_{S\alpha}}{dt} = U_{S\alpha} - I_{S\alpha}R_s; \\ \frac{d\psi_{S\beta}}{dt} = U_{S\beta} - I_{S\beta}R_s; \\ T_e = \frac{3}{2}z_p(\psi_{S\alpha}I_{S\beta} - \psi_{S\beta}I_{S\alpha}), \end{cases}$$
(15)

где  $\psi_{S\alpha}$ ,  $\psi_{S\beta}$  – потокосцепления статора АД, Вб;  $I_{S\alpha}$ ,  $I_{S\beta}$  – статорные токи, А;  $U_{S\alpha}$ ,  $U_{S\beta}$  – статорные напряжения, В;  $R_S$  – активное сопротивление обмотки статора, Ом; (для двигателя, в дальнейшем

используемого на испытательном стенде Пермский национальный исследовательский политехнический университет, составляет 0,305 Ом); *T<sub>e</sub>* – электромагнитный момент, HM; *Z<sub>p</sub>* – число пар полюсов.

Для оценки качества работы наблюдателя момента задавалось ступенчатое воздействие (в виде нагрузки на двигатель), равное 5 % от номинальной величины. Измерение проводилось на лабораторной установке, описание которой представлено ниже. Профиль наблюдаемого и измеренного с помощью датчика момента представлен на рис. 2. Так как данный наблюдатель чувствителен к изменению и точности задания параметров статорной цепи, то результат может быть зашумленным, для того чтобы нивелировать данное явление, был использован фильтр низких частот 3-го порядка с частотой среза 30 Гц.

Так как задача оценки крутящего момента на точке подвеса колонны штанг (ТПКШ) и момента, создаваемого роторным противовесом, сводится к

оценке углового положения  $\theta$ , необходимо также знание угловой частоты вращения выводного вала редуктора  $\omega$  и углового рассогласования между оценкой крутящего момента и фактическим положением роторного противовеса  $\delta$ . Итоговая оценка может быть найдена как (16):

$$\theta = \omega t + \delta. \tag{16}$$

Оценка угловой частоты вращения выходного вала редуктора производится при помощи быстрого преобразования Фурье и выделения основной гармоники амплитудной частотной характеристики. Вместе с тем оценка углового рассогласования может быть получена исходя из закономерности о том, что  $k(\theta)$  и  $T_{\lambda}$  имеют схожий характер и пересекают нуль при равных значениях угловых положений. Таким образом, алгоритм итеративного поиска углового рассогласования может быть представлен следующем образом (рис. 3).



**Рис. 2.** Структурная схема наблюдателя электромагнитного момента (а) и профиль наблюдаемого крутящего момента (б) (синий), реальный момент, измеренный с помощью датчика момента (красный), и наблюдаемый момент, обработанный фильтром низких частот (зеленый)

*Fig. 2.* Block diagram of the electromagnetic torque observer (a) and the profile of the observed torque (b) (blue), the actual torque measured using a torque sensor (red) and the filtered observed torque (green)



- **Рис. 3.** Алгоритм поиска углового рассогласования наблюдаемого момента и реального положения роторного противовеса
  - 3. Algorithm for searching for the angular mismatch of the observed moment and the actual position of the rotary counterweight



- **Рис. 4.** Разработанный лабораторный испытательный стенд: а) структурная схема полунатурной модели ШСНУ; б) внешний вид испытательного стенда
- *Fig. 4.* Developed laboratory test bench: a) block diagram of the semi-natural model of the sucker rod pump unit; b) test bench appearance

#### Результаты эксперимента

Для оценки эффективности предложенного метода был разработан лабораторный испытательный стенд (рис. 4), который включает в себя асинхронные двигатели с соединенными валами и преобразователи частоты:

- АД1 асинхронный двигатель № 1, имитирующий функцию привода;
- АД2 асинхронный двигатель № 2, имитирующий функцию нагрузки;
- ЧП1 частотный преобразователь, управляющий АД1, также содержит наблюдатель электромагнитного момента;
- ЧП2 частный преобразователь двигателя АД2, выполняет функцию управления электромагнитным моментом посредством векторного принципа управления [17–19];
- ГК главный контроллер, осуществляет функции вычисления нагрузочного момента для системы ПЧ2-АД2 по кинематической модели СК, динамограмме, а также угловому положению, полученному с ЧП2. Помимо этого, ГК осуществляет сбор технических параметров работы системы ЧП1-АД1;
- ДС датчик скорости энкодерного типа.

В разработанном стенде использовались преобразователи частоты производства «НПФ Мехатроника-Про», г. Томск. Данные частотные преобразователи имеют открытую программную архитектуру и позволяют использовать алгоритмы собственной разработки для управления электроприводом с помощью программной среды MexBIOS Development Studio [20].

Для моделирования усилия на полированном штоке была использована динамограмма скважины № 250 нефтяного месторождения «Уньва» в Пермском крае. При этом стоит принять во внимание, что скважина, на которой была получена данная динамограмма, не испытывает каких-либо эксплуатационных осложнений и работает в номинальном режиме (рис. 5).

Оценка электромагнитного момента, полученная с ЧП1, передана на ГК, в котором был реализован алгоритм восстановления нагрузочных переменных СК, а также расчет оптимального уравновешивания путем поиска  $T_{MAX}$  (3). Таким образом была получена рекомендация о снижении момента роторного противовеса с 36 до 32.6 кН·м. После установки нового значения было проведено повторное регулирование и замер потребленной активной энергии за равные промежутки времени при равных скоростях качания и нагрузке на ТПКШ (рис. 5).



**Рис. 5.** Динамограмма работы рассматриваемой нефтедобывающей скважины (а) и результат оптимизации с помощью симплекс метода (б)

Fig. 5. Dynamogram of the operation of the oil well in question (a) and the result of optimization using the simplex method (b)

После оптимизации наблюдается неравенство пиков нагрузки при подъеме и спуске колонны штанг. Ввиду того, что целью оптимизации является поиск минимума среднеквадратичного момента на двигателе за цикл качания, обеспечивается и минимум потребления активной мощности из сети. Предметом дальнейших исследований может являться усовершенствование метода оптимизации с учетом контроля зоны отрицательного момента. Однако следует отметить, что в рассмотренном случае зона отрицательного момента на валу электродвигателя снизилась по длительности и глубине.

В результате замеров было выяснено, что вместе со снижением среднеквадратичного значения крутящего момента на 10,32 % за цикл качания была снижена и потребленная активная энергия на 7,15 %. Стоит отметить, что данные показатели будут зависеть от начальных условий работы установки.

#### Заключение

В работе рассмотрен метод оптимального уравновешивания с помощью оценки переменных ШСНУ и разработан критерий оптимального уравновешивания. Нагрузочный момент на валу двигателя, необходимый для расчета переменных ШСНУ был оценён при помощи наблюдателя момента, основанного на статорной модели двигателя. Также для подтверждения результатов было произведено имитационное моделирование системы электропривода установки. Предложенный алгоритм позволил достичь значительного снижения потребленной электроэнергии, а также снизить отрицательные нагрузки на редуктор, что позволит сохранить его ресурс. Разработанный алгоритм может быть выполнен в качестве функции преобразователя частоты приводного электродвигателя ШСНУ. Очевидно, рекомендации об изменении максимального момента роторного противовеса могут быть использованы в процессе наладки или при модернизации установки.

Данные полунатурного моделирования показали существенное снижение энергозатрат (более 10 %) при неизменном режиме эксплуатации скважины. Снижение удельного энергопотребления на тонну добытой нефтяной жидкости при неизменной скорости откачки с использованием предложенной методики оптимального уравновешивания зависит от текущей сбалансированности СК и его типа. Влияние изменения параметров роторного противовеса по предложенной методике на энергопотребление приводного электродвигателя зависит от ряда факторов, таких как тип СК, его начальное уравновешивание, характер нагрузки на полированном штоке, и может быть получено по результатам замера моментограммы и численного моделирования.

# СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Манахов В.А. Диагностика штанговой скважинной насосной установки методом спектрального анализа по параметрам ваттметрограммы // Диспетчеризация и управление в электроэнергетике. 2022. С. 184–187.
- 2. Владимиров О.В., Валиев А.И. Критерии эффективного и энергоэффективного управления процессом добычи нефти с непрерывным регулированием скорости асинхронного двигателя // Аллея науки. 2020. Т. 1. № 12. С. 335–338.
- 3. Оценка нагруженности гидравлических приводов штанговых скважинных насосных установок / Д. И. Шишлянников, М.М. Тактев, А.А. Иванченко и др. // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. 2019. № 4. С. 34–39. DOI: 10.30713/0130-3872-2019-4-34-39
- Оценка влияния уравновешенности привода ШСНУ на энергоэффективность установки / С.Л. Сабанов, А.С. Галеев, Г.И. Бикбулатова, Ю.А. Болтнева // Достижения, проблемы и перспективы развития нефтегазовой отрасли: материалы Международной научно-практической конференции. – Альметьевск, 25–28 октября 2017. – Альметьевск: Альметьевский государственный нефтяной институт, 2018. – Т. 2. – С. 354–359.
- Software complex for sensorless control of an electrical submersible pump / R. Iudin, A. Petrochenkov, E. Solodkiy, D. Vishnyakov, B. Krause, S. Salnikov // IEEE Sensors Journal. – 2023. – P. 1. DOI: 10.1109/JSEN.2023.3331354
- 6. Tecle S.I., Ziuzev A.M., Kostylev A.V. Improving sucker rod pump efficiency using frequency controlled induction motor // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2022. Т. 333. № 11. С. 140–148.
- 7. Солодкий Е.М. Управление штанговой скважинной насосной установкой для добычи нефти с наблюдателями переменных состояния технологического процесса: дис. ... канд. наук. Пермь, 2020. 145 с.
- 8. Вирновский А.С. Теория и практика глубинно-насосной добычи нефти. Избранные труды. М.: Недра, 1971. 183 с.
- A comprehensive review of sucker rod pumps' components, diagnostics, mathematical models, and common failures and mitigations / S. Fakher, A. Khlaifat, M.E. Hossain et al. // Journal of Petroleum Exploration and Production Technology. – 2021. – Vol. 11. – № 10. – P. 3815–3839. DOI: 10.1007/s13202-021-01270-7
- 10. Яшин А.Н., Хакимьянов М.И. Уравновешенность установок скважинных штанговых насосов на основе анализа ваттметрограмм // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2021. Т. 332. № 8. С. 36–44. DOI: 10.18799/24131830/2021/8/3303
- 11. Хакимьянов М.И., Пачин М.Г. Мониторинг состояния штанговых глубиннонасосных установок по результатам анализа ваттметрограмм // Электронный научный журнал Нефтегазовое дело. 2011. № 5. С. 26–36.
- 12. Palka K., Czyz J.A. Optimizing downhole fluid production of sucker-rod pumps with variable motor speed // SPE Production & Operations. 2009. Vol. 24. № 02. P. 346–352. DOI: 10.2118/113186-MS
- 13. Анучин А.С. Системы управления электроприводов. М.: МЭИ, 2015. 378 с.
- 14. Finite control set model predictive torque control of induction machine with a robust adaptive observer / F. Wang, A. Davari, Z. Chen et al. // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2016. Vol. 64. № 4. P. 2631-2641. DOI: 10.1109/TIE.2016.2529558
- 15. Калачев Ю.Н. Векторное регулирование. М.: ЭФО, 2013. 63 с.
- 16. Modern improvement techniques of direct torque control for induction motor drives-a review / N. El Ouanjli, A. Derouich, G. Abdelaziz et al. // Protection and Control of Modern Power Systems. – 2019. – Vol. 4. – № 2. – P. 1–12. DOI: 10.1186/s41601-019-0125-5
- 17. Review on model reference adaptive system for sensorless vector control of induction motor drives / R. Kumar, P. Syam, A. Chattopadhyay et al. // IET Electric Power Applications. 2015. Vol. 9. № 7. P. 496–511. DOI: 10.1049/iet-epa.2014.0220
- 18. Kim Y.R., Sul S.K., Park M.H. Speed sensorless vector control of induction motor using extended Kalman filter // IEEE Transactions on Industry Applications. 1994. Vol. 30. № 5. P. 1225–1233.
- 19. High-performance vector control without AC phase current sensors for induction motor drives: Simulation and real-time implementation / Y. Azzoug, M. Sahraoui, R. Pusca et al. // ISA transactions. 2021. Vol. 109. P. 295–306.
- Practice of using MexBIOS Development Studio technologies in educational process / E.M. Solodkiy, D.A. Dadenkov, A.A. Terehin, I.R. Yusupov // Proceedings of IX International Conference on Power Drives Systems (ICPDS). – Perm, Russia, 2016. – P. 1–5.

#### Информация об авторах

**Евгений Михайлович Солодкий,** кандидат технических наук, доцент кафедры микропроцессорных средств автоматизации Пермского национального исследовательского политехнического университета, Россия, 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29. wsdl00@gmail.com, https://orcid.org/0000-0003-1450-8641

Антон Борисович Петроченков, доктор технических наук, профессор кафедры микропроцессорных средств автоматизации Пермского национального исследовательского политехнического университета, Россия, 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29. pab@msa.pstu.ru, https://orcid.org/0000-0003-0808-351X Сергей Николаевич Кривощеков, кандидат технических наук, доцент кафедры геологии нефти и газа

Пермского национального исследовательского политехнического университета, Россия, 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29. krivoshchekov@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-9748-6291

**Савелий Витальевич Сальников,** инженер кафедры микропроцессорных средств автоматизации Пермского национального исследовательского политехнического университета, Россия, 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29. savelii\_salnikov@rambler.ru, https://orcid.org/0009-0009-4857-2263

**Денис Дмитриевич Вишняков,** учебный мастер кафедры микропроцессорных средств автоматизации Пермского национального исследовательского политехнического университета, Россия, 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29. vdd11@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-3025-2383

**Ростислав Юрьевич Юдин,** инженер I категории кафедры микропроцессорных средств автоматизации Пермского национального исследовательского политехнического университета, Россия, 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29. RJuJudin@pstu.ru, https://orcid.org/0000-0002-3496-5092

Поступила в редакцию: 13.06.2024

Поступила после рецензирования: 04.07.2024

Принята к публикации: 02.04.2025

#### REFERENCES

- 1. Manakhov V.A. Diagnostics of the rod borehole pumping unit by the method of spectral analysis on the parameters of the wattmetrogram. *Dispatching and control in electric power engineering*, 2022, pp. 184–187. (In Russ.)
- 2. Vladimirov O.V., Valiev A.I. Criteria for effective and energy-efficient control of oil production process with continuous speed control of induction motor. *Science Alley*, 2020, vol. 1, no. 12, pp. 335–338. (In Russ.)
- Shishlyannikov D.I., Taktev M.M., Ivanchenko A.A. Assessment of loading of hydraulic drives of rod well pumping units. *Construction of oil and gas wells onshore and offshore*, 2019, no. 4, pp. 34–39. (In Russ.) DOI: 10.30713/0130-3872-2019-4-34-39.
- 4. Sabanov S.L., Galeev A.S., Bikbulatova G.I., Boltneva Y.A. Evaluation of the impact of the balanced drive of the SHNU on the energy efficiency of the plant. *Proceedings of the International Scientific and Practical Conference*. Almetyevsk, October 25–28, 2017. Almetyevsk, Almetyevsk State Petroleum Institute Publ., 2018. pp. 354–359. (In Russ.)
- 5. Iudin R., Petrochenkov A., Solodkiy E., Vishnyakov D., Krause B., Salnikov S. Software complex for sensorless control of an electrical submersible pump. *IEEE Sensors Journal*, 2023, pp. 1. DOI: 10.1109/JSEN.2023.3331354
- Tecle S.I., Ziuzev A.M., Kostylev A.V. Improving sucker rod pump efficiency using frequency controlled induction motor. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering, 2022, vol. 333, no. 11, pp. 140–148. DOI: 10.18799/24131830/2022/11/3955
- 7. Solodkiy E.M. Control of a sucker rod well pumping unit for oil production with observers of technological process state variables. Cand. Dis. Perm, 2020. 145 p. (In Russ.)
- 8. Virnovsky A.S. Theory and practice of deep-pump oil production. Selected works. Moscow, Nedra Publ., 1971. 183 p. (In Russ.)
- 9. Fakher S., Khlaifat A., Hossain M.E. A comprehensive review of sucker rod pumps' components, diagnostics, mathematical models, and common failures and mitigations. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 2021, vol. 11, no. 10, pp. 3815–3839. DOI: 10.1007/s13202-021-01270-7

- Yashin A.N., Khakimyanov M.I. Balance of sucker rod pump units based on analysis of wattmetrograms. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 8, pp. 36–44. (In Russ.) DOI: 10.18799/24131830/2021/8/3303
- 11. Khakimyanov M.I., Pachin M.G. Condition monitoring of rod deep-pumping installations based on the results of wattmetrogram analysis. *Electronic scientific journal Neftegazovoe delo*, 2011, no. 5, pp. 26–36. (In Russ.)
- 12. Palka K., Czyz J.A. Optimizing downhole fluid production of sucker-rod pumps with variable motor speed. *SPE Production & Operations*, 2009, vol. 24, no. 02, pp. 346–352. DOI: 10.2118/113186-MS
- 13. Anuchin A.S. Control systems of electric drives. Moscow, MEI Publ., 2015. 378 p. (In Russ.)
- 14. Wang F., Davari A., Chen, Z. Finite control set model predictive torque control of induction machine with a robust adaptive observer. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2016, vol. 64, no. 4, pp. 2631–2641. DOI: 10.1109/TIE.2016.2529558
- 15. Kalachev Y.N. Vector regulation. Moscow, EFO Publ., 2013. 63 p. (In Russ.)
- 16. El Ouanjli N., Derouich A., Abdelaziz G. Modern improvement techniques of direct torque control for induction motor drives-a review. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2019, vol. 4, no. 2, pp. 1–12. DOI: 10.1186/s41601-019-0125-5
- 17. Kumar R., Syam P., Chattopadhyay A. Review on model reference adaptive system for sensorless vector control of induction motor drives. *IET Electric Power Applications*, 2015, vol. 9, no. 7, p. 496–511. DOI: 10.1049/iet-epa.2014.0220
- Kim Y.R., Sul S.K., Park M.H. Speed sensorless vector control of induction motor using extended Kalman filter. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1994, vol. 30, no. 5, pp. 1225–1233.
- 19. Azzoug Y., Sahraoui M., Pusca R. High-performance vector control without AC phase current sensors for induction motor drives: simulation and real-time implementation. *ISA transactions*, 2021, vol. 109, pp. 295–306.
- 20. Solodkiy E.M., Dadenkov D.A., Terehin A.A., Yusupov I.R. Practice of using MexBIOS Development Studio technologies in educational process. *Proceedings of IX International Conference on Power Drives Systems (ICPDS)*. Perm, Russia, 2016. pp. 1–5.

#### Information about the authors

**Evgeny M. Solodky**, Cand. Sc., Associate Professor, Perm National Research Polytechnic University, 29, Komsomolsky avenue, Perm, 614990, Russian Federation. wsdl00@gmail.com, https://orcid.org/0000-0003-1450-8641

**Anton B. Petrochenkov**, Dr. Sc., Professor, Perm National Research Polytechnic University, 29, Komsomolsky avenue, Perm, 614990, Russian Federation. pab@msa.pstu.ru, https://orcid.org/0000-0003-0808-351X

**Sergey N. Krivoshchekov**, Cand. Sc., Associate Professor, Perm National Research Polytechnic University, 29, Komsomolsky avenue, Perm, 614990, Russian Federation. krivoshchekov@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-9748-6291

**Savely V. Salnikov**, Engineer, Perm National Research Polytechnic University, 29, Komsomolsky avenue, Perm, 614990, Russian Federation. savelii\_salnikov@rambler.ru, https://orcid.org/0009-0009-4857-2263

**Denis D. Vishnyakov**, Educational Master, Perm National Research Polytechnic University, 29, Komsomolsky avenue, Perm, 614990, Russian Federation. vdd11@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-3025-2383

**Rostislav Yu. Yudin**, Engineer of the I category, Perm National Research Polytechnic University, 29, Komsomolsky avenue, Perm, 614990, Russian Federation. RJuJudin@pstu.ru, https://orcid.org/0000-0002-3496-5092

Received: 13.06.2024 Revised: 04.07.2024 Accepted: 02.04.2025 UDC 621.314 DOI: 10.18799/24131830/2025/5/4857 Review article

# Advantages of using transformers with high temperature superconducting windings at high frequency in mobile and autonomous power supply systems

# R.G. Galeev<sup>1⊠</sup>, V.Z. Manusov<sup>2</sup>, E.N. Larkin<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russian Federation
 <sup>2</sup> Yugra State University, Khanty-Mansiysk, Russian Federation
 <sup>3</sup> Siberian State University of Water Transport, Russian Federation

<sup>⊠</sup>galeew.ratmir@yandex.ru

Abstract. Relevance. Active and passive elements of transformer power equipment have sufficiently reduced the potential for modernization and improvement that requires new innovative solutions. This largely relates to mobile and autonomous power supply systems, in particular for geoengineering tasks when changing the location of geo-surveying works. *Aim.* New design of transformer power equipment based on cryogenic technologies with improvement of their electrical, technical and economic characteristics involves the use of liquid nitrogen with a temperature of 77 K as a cryogenic dielectric medium. Methods. Mathematical modeling of the skin-effect by a finite-element method, determination of the amorphous alloy magnetic core characteristic by an empirical method, and physical simulation of an experimental model for a high temperature superconducting transformer prototype. Results and conclusions. The paper introduces the analysis and synthesis of characteristics of amorphous iron magnetic core and superconducting windings in a high temperature superconducting transformer. The authors have derived dependencies and charts illustrating the effect of increased current frequency on thermal losses associated with hysteresis and eddy currents, which determine the losses in the magnetic core. The paper demonstrates the dependence of mass and dimensions reduction and winding material consumption on frequency and current density in high temperature superconducting tapes, which can reach 500 A/mm<sup>2</sup>. This affects in its turn the size of transformer windings and, therefore, the size of the magnetic core. The most significant result with the use of superconductivity in high temperature superconducting transformers is the fact that this transformer is an ideal diamagnetic, and the windings have high electrical conductivity. Therefore, the problem of current concentration near the conductor surface skin-effect and resistance increase is eliminated in transformers and electric machines. The absence of skin-effect in high temperature superconducting conductors due to zero resistance is proved by the theoretical analysis using Bessel functions. The importance of the results involves the increase of transformer efficiency at higher frequencies due to the synthesis of properties of transformer active elements, such as amorphous iron magnetic core, high temperature superconducting windings and liquid nitrogen as a dielectric medium. On this basis, a 25 kVA high temperature superconducting transformer industrial prototype was designed and assembled.

Keywords: skin-effect, superconductivity, high frequency, amorphous magnetic core, HTS transformer, liquid nitrogen

**For citation:** Galeev R.G., Manusov V.Z., Larkin E.N. Advantages of using transformers with high temperature superconducting windings at high frequency in mobile and autonomous power supply systems. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 5, pp. 183–194. DOI: 10.18799/24131830/2025/5/4857

УДК 621.314 DOI: 10.18799/24131830/2025/5/4857 Шифр специальности ВАК: 2.4.3 Обзорная статья

# Преимущества использования трансформаторов с высокотемпературными сверхпроводящими обмотками на повышенной частоте в мобильных и автономных системах электроснабжения

### Р.Г. Галеев1<sup>™</sup>, В.З. Манусов<sup>2</sup>, Е.Н. Ларкин<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Новосибирский государственный технический, Россия, г. Новосибирск <sup>2</sup> Югорский государственный университет, Россия, г. Ханты-Мансийск <sup>3</sup> Сибирский государственный университет водного транспорта, Россия, г. Новосибирск

<sup>™</sup>galeew.ratmir@yandex.ru

Аннотация. Актуальность. Активные и пассивные элементы трансформаторного электрооборудования достигли своего предела совершенства, что существенно ограничивает возможности для дальнейшей модернизации и требует разработки новых инновационных решений. Это в значительной степени относится к мобильным и автономным системам электроснабжения, в частности для решения задач геоинжиниринга при изменении локации геоизыскательных работ. Цель. Новое конструктивное исполнение трансформаторного электрооборудования на основе криогенных технологий с улучшением их электрических и технико-экономических характеристик, где в качестве криогенной диэлектрической среды используется жидкий азот при температуре 77 К. Методы. Математическое моделирование явления скин-эффект методом конечных элементов; определение характеристики магнитопровода из аморфного сплава эмпирическим методом и физическое моделирование экспериментальной модели прототипа высокотемпературного сверхпроводящего трансформатора. Результаты и выводы. Приведен анализ и синтез характеристик магнитопровода из аморфного железа и сверхпроводящих обмоток в высокотемпературном сверхпроводящем трансформаторе. Получены зависимости и графики влияния повышения частоты тока на тепловые потери, связанные с гистерезисом и вихревыми токами, из которых складываются потери в магнитопроводе, а также показана зависимость уменьшения массы сердечника и витков обмоток от частоты с использованием высокотемпературной сверхпроводящей ленты, в которой плотность тока может достигать 500 А/мм<sup>2</sup>. Это в свою очередь влияет на размеры обмоток трансформатора и, следовательно, на размеры магнитопровода. Наиболее существенным результатом с использованием явления сверхпроводимости в высокотемпературных сверхпроводящих трансформаторах является тот факт, что они являются идеальным диамагнетиками, а обмотки имеют высокую величину электрической проводимости, следовательно, в трансформаторах и электрических машинах исчезает проблема вытеснения тока к поверхности проводника - «скин-эффект» и увеличения сопротивления. С помощью теоретического анализа с использованием условий функций Бесселя доказано отсутствие скин-эффекта в высокотемпературных сверхпроводящих проводниках по причине нулевого активного сопротивления. Значимость результатов заключается в повышении КПД трансформатора при работе на повышенных частотах благодаря синтезу свойств активных элементов трансформатора: магнитопровода из аморфного железа, высокотемпературных сверхпроводящих обмоток и диэлектрической среды из жидкого азота. На этой основе разработан и создан промышленный экземпляр высокотемпературного сверхпроводящего трансформатора мощностью 25 кВА.

**Ключевые слова:** скин-эффект, сверхпроводимость, повышенная частота, аморфный магнитопровод, ВТСП трансформатор, жидкий азот

Для цитирования: Галеев Р.Г., Манусов В.З., Ларкин Е.Н. Преимущества использования трансформаторов с высокотемпературными сверхпроводящими обмотками на повышенной частоте в мобильных и автономных системах электроснабжения // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 5. – С. – 183–194. DOI: 10.18799/24131830/2025/5/4857

#### Introduction

When designing autonomous and mobile power supply systems and conducting geological survey expeditions, the issue of energy efficiency and mass and dimensional parameters of transformer power equipment and energy storages is urgent. The use of semiconductor voltage converters, which can replace power transformers operated on the physical phenomenon of electromagnetic induction, is a promising direction of power engineering development. However, semiconductor devices are very expensive equipment at the moment and also very unreliable that can lead to power supply failures and even accidents under specific circumstances. The priority device for voltage transformation at a given frequency is transformer power equipment based on magnetically coupled inductive coils (inductors).

A transformer, being a highly reliable device of simple construction, has a low specific power per unit mass, approximately 180 W/kg. Taking into account that transformer power equipment is included in the mobile power supply system, its energy efficiency and mass and dimensions parameters have a great effect on the ability of mobile objects to move during geological explorations, in particular in the northern regions of Russia, including the Polar (Arctic) Circle. The use of an increased frequency of the generation source, an amorphous magnetic core and superconducting in the complex will significantly reduce the weight and size characteristics and increase efficiency of transformers.

Earlier, a practical investigation of a high-frequency pulse power transformer with a mixed core at 200 kHz was carried out 1. The author concluded that the combination of core layers of amorphous, ferrite and electrical iron resulted in a decrease in the hot spot temperature that increased the rated power of the transformer. The numerical simulation of the skin-effect (SE) is performed in 2 with the determination of its influence on the reactance and comparison with experimental measurements of copper wires at  $0.1 \cdot 10^4$  kHz. The paper [3] describes the anisotropy of the critical current in a superconducting air-core transformer at 2.2 kHz. The impact of cryogenic environment on the characteristics of electrical and amorphous iron magnetic cores is shown in [4, 5].

**Aim.** New design of transformer power equipment based on cryogenic technologies with improvement of their electrical, technical and economic characteristics involves the use of liquid nitrogen with a temperature of 77 K as a cryogenic dielectric medium.

In practice, several methods are used to reduce the mass-dimensional parameters of transformer power equipment, namely:

- application of magnetic core material with high magnetic characteristics at an increase in frequency up to 800 Hz;
- application of materials with high current density for transformer windings;
- increase of the operating frequency in the electrical system.

#### **Basic background**

At present, most transformer magnetic cores are made of electrical steels and ferrites. The maximum operating induction, at which a transformer has acceptable magnetic core losses within the technical specifications, is in the range of  $B_c$ =1.6–2 T. Reduction of transformer dimensions by increasing the current density is a promising direction due to the development of high temperature superconducting (HTS) wires of the 2<sup>nd</sup> generation [6–9].

The design of transformer windings from a superconducting wire, which has zero AC resistance at the boiling temperature of liquid nitrogen 77 K/–198 °C, allows eliminating resistance losses [5]. The current density in a superconducting wire can reach 500 A/mm<sup>2</sup>, in comparison with 2.8 A/mm<sup>2</sup> for copper. The difference of 250 times has a significant role in reducing the volume and weight of transformer windings [10–13].

The most effective method to reduce the dimensions and weight of the transformer is related to the increase of the operating current frequency (1), but requires a careful approach to the selection of applied materials and transformer design [14–16]:

$$d = 0,507 \sqrt[4]{\frac{P'\beta a_r k_r}{f u_r B^2 K_c^2}},$$
 (1)

where *P*' is the single-phase power;  $\beta = \pi d/l$  is the value determining the ratio between the diameter (*d*) and the height (*l*) of the winding; *a<sub>r</sub>* is the effective width of the dissipation field; *k<sub>r</sub>* is the coefficient of reducing the ideal dissipation field to the actual one (Rogowski coefficient); *f* is the network frequency, Hz; *u<sub>r</sub>* is the reactive component of the short circuit voltage, %; *B* is the maximum induction in the core leg; *k<sub>c</sub>* is the coefficient of filling the circle area with steel.

As follows from (1), the AC frequency and the core diameter are inversely proportional. Consequently, the magnetic core weight of a superconducting transformer is significantly reduced. When increasing the frequency, the number of turns of the transformer windings decreases (2). It should be noted that when the winding diameter decreases, the distance between the core legs also decreases. This results in a reduction of the window area of the magnetic core. Consequently, the volume and weight of the core iron decreases.

$$W = \frac{U}{4,44\,fBS}\,,\tag{2}$$

where U is the voltage; S is the active electrical steel area of the magnetic core.

# Mathematical models and analysis of the SE for transformer operation at high frequency

The use of high frequencies always results in the current concentration near the outer part of the conductor, which was called the SE [17–19].

At the industrial frequency of 50 or 60 Hz used in the world practice, the resistance to the SE is negligible and is not usually taken into account. The effect is caused by the presence of the magnetic flux in the internal part of the conductor, which is induced by the operating current in the wire. The current induced by the internal magnetic flux has an opposite direction to the operating current I when being closer to the center of the wire, and has the same direction for the outer part of the conductor. The SE results in the exponential decrease of the current density with the depth.

The non-uniform current distribution along the cross section of the conductor can be clarified by theoretical analysis using Bessel functions, which consider the presence of internal induction in the conductor being several orders of magnitude less than the external induction. For complex amplitudes of the current density and the magnetic field strength, equations (3), (4) are applied:

$$\frac{d^2 J_m}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dJ_m}{dr} = j\omega\mu\sigma J_m,$$
(3)

$$\frac{d^2 \dot{H}_m}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d \dot{H}_m}{dr} - \frac{\dot{H}_m}{r^2} = j \omega \mu \sigma \dot{H}_m, \quad (4)$$

where  $J_m$  is the complex amplitude of the current density;  $\dot{H}_m$  is the magnetic field strength; *r* is the resistance;  $\sigma$  is the conductivity of the conductor;  $\mu$  is the magnetic permeability;  $\omega$  is the angular frequency.

The impedance of a cylindrical conductor is determined by the sum of the internal impedance and the external impedance of the conductor (5), (6):

$$Z = Z_{\rm in} + Z_{ext} \,. \tag{5}$$

The internal impedance is defined by equation (6):

$$Z_{in} = R_{dc} \cdot \frac{u_a}{2} \frac{J_0(u_a)}{J_1(u_a)} = Re(Z_{in}) + I_m(Z_{in}) , \qquad (6)$$

where  $R_{dc}$  is the DC resistance of the conductor under steady-state conditions;  $J_0(u_a)$  and  $J_1(u_a)$  are the Bessel functions of the zero and first order, respectively;  $u_a = j^{2/3}\sqrt{2x}$ ,  $x=a/\delta$ , *a* is the conductor radius;  $\delta$  is the surface layer depth;  $Re(Z_{in})$  is the real component of the internal impedance;  $I_m(Z_{in})$  is the complex inductive component of the internal impedance.

The external impedance is defined by equation (7):

$$Z_{ext} = jX_{ext} = j2\pi f L_{ext} \,. \tag{7}$$

The series decomposition of the Bessel function is given by (8):

$$\frac{u_a}{2} \frac{J_0(u_a)}{J_1(u_a)} = 1 - \frac{u_a^2}{8} - \frac{u_a^4}{192} - \frac{u_a^6}{3074} - \dots$$
(8)

The electromagnetic surface depth  $\delta$  (9), at which the current density is 1/e ( $\approx 37\%$ ) of its surface density, is determined by the equation [17]:

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{\pi\sigma f\,\mu}}\,,\tag{9}$$

where  $\sigma$  is the conductivity of the conductor;  $\mu$  is the permeability of the conductor.

From the surface to the center of the conductor, the current density J decreases according to the exponential dependence (10):

$$J_{Z} = J_{0} \cdot e^{-\frac{z}{\delta}}, \qquad (10)$$

where  $J_0$  is the current density at the surface; z is the depth of the calculation.

It follows from (6) and (7) that the closer to the center of the conductor, the lower the current density. Thus, a considerable area of the wire cross-section is not involved in the electricity transmission (Fig. 1).

The above analysis shows that it is necessary to take into account the SE when designing a superconducting transformer operated at high frequencies. Using ELCUT software (professional version 6.6) [20], the simulation of current concentration near the surface was carried out by a finite-element method for a copper conductor of 5.7 mm diameter and 2.4 A/mm<sup>2</sup> current density at AC frequencies of 200, 400 and 800 Hz.



Fig. 1. Current density change along the conductor cross section

Fig. 2 shows a color diagram of the current concentration near the conductor surface (SE illustration). A finite element mesh with 1306 nodes was obtained in the cross section of the 25.5 mm<sup>2</sup> copper conductor with a sampling step of 0.05 mm. This fully illustrates the phenomenon when the SE becomes more evident at 400 Hz and above. Copper is

**Рис. 1.** Изменение плотности тока по поперечному сечению проводника

diamagnetic in its magnetic properties, but its magnetic permeability is greater than zero being equal to  $\mu$ =0.999990. This results in the magnetic field penetration into the conductor depth and the formation of magnetic induction of a certain strength leading to the appearance of eddy currents. The increase of eddy currents, in its turn, causes more intensive current forcing to the conductor surface. In this regard, the rise of heat generation and voltage drop are observed.



Fig. 2. Color diagram of the SE when forcing the current to the conductor surface with the frequency increase
Puc. 2. Цветовая диаграмма скин-эффекта тока к поверхности проводника с увеличением частоты

Superconductors are absolute diamagnetics, which magnetic permeability is zero. This means that the magnetic field is completely eliminated from the conductor volume under the superconducting state. In a superconductor, electrons form pairs called Cooper pairs, thus providing the superconducting state. They have zero spin and can move without interaction with the crystal lattice, causing zero resistance in the material. This is confirmed by the effect of expelling the external magnetic field from the superconductor body due to internal eddy currents (Meissner effect) in superconductors. HTS conductors have zero resistance at 77 K, hence it is difficult to apply equation (9).

# Investigation of HTS transformers at high frequencies

For investigating the properties and characteristics of the transformer magnetic core made of the soft magnetic fast-quenched 1CP amorphous alloy with the 1B AMET magnetic core were analyzed at different network frequencies [21]. Fig. 3 shows the hysteresis loop of the amorphous core obtained experimentally using an oscilloscope. The rectangular shape of the loop is a feature of amorphous alloys, due to which the value of coercive force corresponds to the operating value of magnetic field strength.



Fig. 3. Magnetic characteristic of the 1B AMET magnetic core

**Рис. 3.** Магнитная характеристика магнитопровода 1 В АМЕТ

The 1CP tape has the following alloying elements: B, Si, P, C, Co, Ba. Obtained by quenching from the liquid state due to high cooling rate (>1000 K/s), the metal passes into the passive state that provides high corrosion resistance for various aggressive media. These properties of amorphous alloys make them an excellent analog of conventional electrical steel for designing power transformers with high energy efficiency [22, 23].

Table 1 shows the technical characteristics of the HTS transformer.

The investigation is particularly focused on the relationship between the transformer core remagnetization frequency and the change of the magnetic core dimensions, hysteresis loop losses and eddy current losses.

The remagnetization losses and eddy current losses are calculated according to the Steinmetz equation [16]:

$$P_h = nfB^2G_{st},\tag{11}$$

$$P_{ed} = y f^2 B^2 G_{st}, \tag{12}$$

where y and n are the coefficients characterizing the used ferrimagnetic material;  $G_{st}$  is the transformer core weight.

The coefficients n and y were determined from the parameters of the hysteresis loop area to the magnetic core volume at 50 Hz (Fig. 3) and specific losses in the 1B amorphous alloy.

Table 1.	Initial	technical	characteristics	of	the	HTS
	transfo	rmer				

**Таблица 1.** Параметры сверхпроводящего трансформатора

Parameter/Параметр	Value/Величина		
Rated power, kVA	100		
Номинальная мощность, kVA	100		
Number of phases/Ччисло фаз		3	
Winding connection	^ / <sup>*</sup>	Vn 0	
Соединение обмоток	$ \Delta /$	111-0	
Cryostat material	Expanded j	oolystyrene	
Материал криостата	Пенопол	истирол	
Dielectric medium	Liquid 1	nitrogen	
Диэлектрическая среда	Жидки	ıй азот	
Operating temperature, K	7	7	
Температура жидкой фазы, К	/	/	
Current frequency, Hz/Частота, Гц	50, 200, 400, 800		
Winding parameters/Пара	аметры обмото	к	
Type of winding	HV winding	LV winding	
Тип обмотки	Обмотка ВН	Обмотка НН	
Rated voltage, V	10000	400	
Номинальное напряжение, В	10000		
HTS tape width (ширина высокотем-			
пературной сверхпроводящей лен-	4×0,1	12×0,1	
ты, мм), mm			
Insulation	Polyamic	le varnish	
Изоляция	Полиами	дный лак	
Rated current/Номинальный ток, А	3.7	162.5	
Current density, A/mm <sup>2</sup>	0.25	125	
Плотность тока, А/мм <sup>2</sup>	9.23	155	
Magnetic core parameters/Параме	тры магнитно	й системы	
Material	Amorphous m	agnetic core 1B	
Материал	Аморфный ма	агнитопровод	
Alloying elements	D C; D	C Co Po	
Легирующие элементы	D, 3I, P,	с, со, ba	
Saturation induction, Bm	1,	57	
Индукция насыщении, Вт			

The obtained dependences of the magnetic core losses with the frequency increase are shown in Fig. 4.

According to Steinmetz equation (11), (12) and Fig. 4, there is a linear dependence of hysteresis losses and an exponential dependence of eddy current losses on the frequency increase. Modern electrical steels have relatively high magnetic saturation induction up to 2 T [24], but low magnetic permeability that, in its turn, leads to a considerable increase in the magnetic field strength to achieve the required induction in the core. This results in an enlarged area of the hysteresis loop that illustrates remagnetization losses.

To reduce the losses in the magnetic core associated with the core remagnetization, it is reasonable to use amorphous alloys. Such alloys lack strict periodicity and long-range order in the arrangement of atoms that is inherent in the crystal structure of magnetically soft electrical steels, which do not have inter-domain boundaries, as shown in Fig. 5. Due to high values of magnetic permeability ( $\mu$ =50000–70000), amorphous alloys are preferably used in power transformers at high frequencies [25].



- **Fig. 4.** Dependences of hysteresis losses and eddy current losses: a) electrical steel of 3408 grade:  $P_{id}$  are the losses in the magnetic circuit b) 1B amorphous magnetic core:  $P_{id}$  are the losses in the magnetic circuit;  $P_{ed}$  are the eddy current losses;  $P_h$  are the hysteresis losses
- Рис. 4. Потери в магнитопроводе при повышении частоты: а) электротехническая сталь 3408: P<sub>id</sub> – полные потери в магнитопроводе; b) Аморфный магнитопровод марки 1B: P<sub>ed</sub> – потери на вихревые токи; P<sub>h</sub> – потери на гистерезис



Fig. 5. Atoms of: a) crystal; b) amorphous structure Puc. 5. Расположение атомов: а) кристаллической и b) аморфной структуры

For modern electrical steel used in a transformer, with plate thicknesses of 0.17–0.5 mm and depending on the magnetic core design, the ratio  $P_B/P_h$  can vary in the range of 0.2–7. In the case of amorphous iron, the ratio  $P_B/P_h$  is in the range of 0.17–2.9 at high network frequencies of 50–800 Hz. This is due to the high resistivity of 100–300 µOhm·cm, which is slightly higher than the resistance of cold-rolled steel being in the range of 40–80 µOhm·cm [26, 27].

The next important point is to reduce the core volume, hence its weight according to (1). The dependence f and the magnetic core weight are inversely proportional as presented in Fig. 6.



 
 Fig. 6.
 Dependence between the remagnetization frequency and the core weight

 Puc. 6.
 Зависимость массы сердечника от частоты

In the paper, the dependence illustrating the effect of increasing frequency on the EMF (13) growth was obtained that directly affects the number of turns of transformer windings (Fig. 7). The found characteristics of the HTS transformer at the frequency increase are summarized in Table 2.

$$E = 4,44 fBS. \tag{13}$$



Fig. 7. Dependence between the core remagnetization frequency and the number of turns of high voltage and low voltage windings

**Рис. 7.** Зависимость количества витков обмотки от частоты тока

#### HTS transformer prototype

The presented paper considers a model of a HTS transformer with a spatial design (i.e. legs in different planes) of the magnetic system (Fig. 8). This design is characterized by the presence of the so-called "warm" magnetic core. It means that there is no direct contact between the core and the cryogenic medium. This technical solution imposes certain limitations on the design and production of the cryostat.

Table 2.	Technical parameters of the HTS transformer						
Таблица 2.	Технические параметры ВТСП трансформа-						
	mona						

тори				
f (network frequency/частота сети), Hz	50	200	400	800
d (leg diameter/диаметр стержня), m	0.135	0.095	0.08	0.067
G <sub>st</sub> (magnetic core weight/ масса магнитопровода), kg	432	184	123	81
Et (turn EMF/ЭДС витка), V	3.382	6.701	9.623	13.32
w <sub>Lv</sub> (number of secondary turns/ количество витков вторичной обмотки)	68	34	24	17
w <sub>Hv</sub> (number of primary turns/ количество витков первичной обмотки)	2945	1473	1040	737
$\Phi_{\rm m}$ (magnetic flow/магнитный поток), Wb	0.015	0.008	0.005	0.004
P <sub>h</sub> (hysteresis losses/потери на гистере- зис), W	171	297	396	532
P <sub>ed</sub> (eddy current losses/потери на вихревые токи), W	25	223	594	1595
Pid (core losses/потери в сердечнике). W	196	521	990	2127



- Fig. 8. HTS transformer design: a) 3D model of the cryostat with the spatial magnetic system: 1 cryostat cover;
  2 glass fiber plastic; 3 cryogenic medium with liquid nitrogen; 4 polystyrene foam; 5 thermal insulating tubes for magnetic core legs; b) prototype of a transformer
- Рис. 8. Конструкция ВТСП трансформатора: a) 3Dмодель кристалла с пространственной магнитной системой: 1 – крышка криостата; 2 – стеклотекстолит; 3 – криогенная среда с жидким азотом; 4 – пенополистирол; 5 – теплоизоляционные трубки для стержней магнитопровода; б) прототип трансформатора

One of the key aspects of this design is the reduction of heat fluxes from the magnet core into the liquid nitrogen. Since the core is not directly located in the cryogenic circuit, heat losses caused by magnet core heating are minimized (Fig. 9). This will avoid losses of cryogenic liquid that has a positive effect on the transformer efficiency and diminishes the need for frequent replenishment of liquid nitrogen [28].

The simultaneous application of the spatial magnetic system (i.e. legs in different planes) allows reducing the core yoke size by half that considerably decreases the core weight. In this case, the full symmetry of the magnetic system is maintained. As a consequence, the no-load current of the transformer and the magnetic core losses are significantly reduced.



Fig. 9. Industrial prototype of the HTS transformer Puc. 9. Промышленный прототип ВТСП трансформатора

# Dielectric cryogenic medium in the form of liquid nitrogen

Liquid nitrogen is one of the most widely used cryogenic dielectrics. With a boiling temperature of 77 K, it has high thermal conductivity and low viscosity that makes it ideal for using in HTS cooling systems. Unlike many other dielectrics, polymers and some electrical oils, liquid nitrogen is not subject to aging processes that ensures the stability of its characteristics over time. Its simple molecular structure (N<sub>2</sub>) eliminates the formation of decomposition products that also provides the reliability of systems using liquid nitrogen as a cooling agent [29].

The electrical breakdown in liquid nitrogen is possible in the presence of impurities, including unstable atoms, ions and insulation material deposits. These impurities can significantly reduce the electrical strength of the dielectric, so their presence should be strictly controlled. To prevent such problems, purification and filtration methods are used for nitrogen before using in critical applications. The physical properties of liquid nitrogen are summarized in Table 3.

Low reactivity helps to reduce or eliminate the liquid nitrogen impact on active (windings, magnetic core) and passive (insulating materials, cryostat) transformer elements.

#### **Discussion of results**

The conducted investigations confirmed the practicability of increasing the AC network frequency up to 800 Hz. This is especially important for considerable reduction of dimensional and weight parameters of electrical installations in mobile, autonomous and local power supply systems, as well as for solving geoengineering tasks when changing the location of geo-surveying works [30]

# Table 3.Physical properties of liquid nitrogen at 77.3 K<br/>and 0.10 MPa

**Таблица 3.** Физические свойства жидкого азота при температуре 77,3 К и 0,10 МПа

Parameter	Value
Параметр	Величина
Molar mass, g·mol-1/Молярная масса, г·моль-1	28.01
Liquid phase density at saturation, kg⋅m- <sup>3</sup>	9074
Плотность жидкой фазы при насыщении, кг∙м <sup>-3</sup>	007.4
Gas phase density at saturation, kg⋅m <sup>-3</sup>	4604
Плотность газообразной фазы при насыщении, кг·м- <sup>3</sup>	4004
Speed of sound in liquid phase, m·s⁻¹	
Относительная диэлектрическая проницаемость	860
газообразного азота, м∙с-1	
Volumetric expansion of liquid (77.3 K, 0.10 MPa)	
into gas (293 K, 0.10 MPa)	1.604
Объемное расширение из жидкости (77.3 К, 0.10 МПа)	1.094
в газ (293 К, 0.10 МПа)	
Relative permittivity of liquid nitrogen	
Относительная диэлектрическая проницаемость	1.46
жидкого азота	
Relative permittivity of gaseous nitrogen	
Относительная диэлектрическая проницаемость	1.00
газообразного азота	
Electrical resistivity, Ohm∙m	<b>&gt;1.10</b> <sup>16</sup>
Удельное электрическое сопротивление, Ом∙м	>1110
Surface tension, N·m <sup>-1</sup>	89.10-3
Поверхностное натяжение, Н·м-1	0.910
Dynamic viscosity, Ра·s/Динамическая вязкость, Па·с	1.65.10-4
Thermal conductivity, W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup>	0.14
Теплопроводность, В·м-1·К-1	0.14
Heat capacity, J·g <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> /Теплоемкость, J·г <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup>	2.04
Enthalpy of vaporization, J·g <sup>-1</sup>	100.2
Энтальпия парообразования, J·г <sup>-1</sup>	199.3
Critical point at 3.35 MPa, K	126.21
Критическая точка при 3,35 МПа, К	120.21
Triple point at 0.0125 MPa, K	63.1
Тройная точка при 0,0125 МПа, К	03.1

In particular, in many power supply systems of this kind at river and sea vessels and aircrafts the transition to the higher frequency has already been performed. For example, 200 Hz frequency is used at hydrofoils in Russia, while 400 Hz frequency is used in the defense industry of some countries. However, having the possibility of reducing the resistance to zero in superconductors, it is reasonable to increase the frequency up to 800 Hz. This will allow achieving duplication of energy efficiency for electrical installations. In this case, energy efficiency is still estimated in considerable reduction of consumables or initial investments and decrease of active power losses during operation. Since energy efficiency is a system concept, it will be the subject of a separate paper. But it is quite obvious, since in remote power supply systems, for example, a geological expedition with variable location, the weight characteristics and dimensions are of great importance while moving. More important advantage is that the autonomous generation source used in such cases can have a smaller generation power, thus also reducing their cost. Finally, the replacement of the dielectric medium (i.e. liquid nitrogen) can be carried out at any point of geolocation of the engineering team or expedition from the air using a turboexpander by the technology of Academician P. Kapitsa.

The paper demonstrates the frequency increase impact on the cross-section of winding conductors caused by the SE. In addition, it affects the magnetic core characteristics, that is why it is reasonable to use amorphous iron, and, in general, the mass and dimensions parameters of the transformer [31].

The obtained dependences, presented in Fig. 4, 6, 7, show that the synthesis of such parameters as the frequency increase and the amorphous iron magnetic core results in the exponential increase of heat losses in the magnetic core based on Steinmetz equations (11) and (12). This requires the decrease of the magnetic core induction with increasing electric current frequency that, in the end, affects the number of winding turns and the core weight. The presence of the cryostat requires 10–20 mm of wall thickness (Fig. 8) to maintain a cryogenic temperature of 77 K. This is generally compensated by the insulating layers between the windings and the magnetic core.

For example, the mass and dimensions parameters of a HTS transformer having the windings immersed in a cryostat, liquid nitrogen as a dielectric medium, and a warm magnetic core, are 432 kg at 50 Hz (industrial frequency), 123 kg at 400 Hz (i.e. 3.5 times less), and 86 kg at 800 Hz (i.e. more than 5 times less than at the industrial frequency).

It should be noted that a HTS transformer at the same frequency is more than 2–2.5 times smaller in dimensions than a conventional transformer [28, 32]. Taking into account the frequency increase, its mass and dimensions parameters are almost 10 times less than a conventional transformer at the industrial frequency. Therefore, it is more energy efficient than a conventional transformer by an order of magnitude [33–36].

In recent years, the tendency of increasing the operating frequency has become one of the main vectors of power industry development in distributed generation due to the improvement of technical and economic costs. In addition, the performance characteristics of sea and airborne transportation facilities are enhancing. However, this tendency is strongly limited by the phenomenon of current concentration near the conductor surface, the so-called SE, which increases the resistance of conductors and active power losses in them, thus reducing the energy efficiency of power equipment. For example, the resistance increases approximately 2.5-3 times at 400 Hz in comparison with the resistance at the industrial frequency of 50 Hz. As a consequence, active power losses in transformer windings increase proportionally to the resistance. While in the case of windings made of superconductor materials, it is reasonable to use the frequency of 800 and 1000 Hz. The use of HTS conductors in high frequency power equipment has a

synergistic effect due to the fact that HTS is an absolute diamagnetic in the superconducting state that prevents the magnetic field penetration into the conductor depth and the formation of a surface layer.

The phenomenon of superconductivity and the possibility of ensuring it at the temperature of liquid nitrogen (77 K) opens almost unlimited directions for the use of higher frequencies, since the resistance is zero at any frequency, and, therefore, the problem of frequency limitation is completely eliminated. At present, this has not yet been realized by the power engineering community. In this paper, we have made an attempt to show that the mass and dimensions parameters of power equipment are reduced by 5–6 times at the frequency of 400 Hz applied for mobile systems when using superconducting windings, and by 9–12 times at the frequency of 800 Hz, which we reasonably suggest to investigate and implement.

An extremely important advantage of HTS transformers is the ability to self-limit short-circuit currents after leaving the superconducting state by a transformer, which is detailed in [32].

#### Conclusions

- 1. The practicability of the frequency increase up to 800 Hz instead of the industrial frequency of 50 Hz for mobile, autonomous and local power supply systems has been proved. In this case, active power losses in transformer windings are reduced to zero that allows increasing the current density from 2.4 to 500 A/mm<sup>2</sup> in HTS transformer windings. Then, it obviously results in the decrease of mass and dimensions parameters of HTS transformers and generation sources operated at the object.
- 2. It can be stated that the resistance of superconducting winding wires is reduced to zero when being of cryogenic design and in the dielectric medium in the form of liquid nitrogen (77 K). This results in removing the negative effect of forcing the current to the conductor surface with the frequency increase SE, in which the resistance increases by 2.5-3 times at 800 Hz. It is equivalent to the removal of the power consumer from the generation source at the distance of three times greater with the corresponding lengthening of the transmission line. However, this effect is not observed in superconductors, therefore it gives new opportunities for increasing the AC frequency.
- 3. In addition, it was shown that the use of amorphous iron as a core for a HTS transformer at higher frequencies reduces the magnetic core losses and increases the value of induction in the magnetic core.
- 4. The proposed technical solutions are implemented in the design and construction of the industrial prototype of 25 kVA, which confirmed the reliability of the general theoretical propositions on the energy efficiency.

#### REFERENCES

- 1. Arun P. Practical study of mixed-core high frequency power transformer. *Magnetism*, 2022, no. 2, pp. 306–327. DOI: 10.3390/2030022
- Chan H. L., Cheng K.W.E., Sutanto D. Calculation of inductances of high frequency air-core transformers with superconductor windings for DC-DC converters. *IEE Proceedings: Electric Power Applications*, 2003, vol. 150, no. 4, pp. 447–454. DOI: doi.org/10.1049/ip-epa:20030257.
- 3. Liu G., Zhang G., Liu G., Wang H., Jing L. Experimental and numerical study of high frequency superconducting air-core transformer. *Superconducting Science Technology*, 2021, vol. 34, no. 8, Art. no. 85011.
- 4. Pronto A.G., Maurício A., Pina J.M. Magnetic properties measurement and discussion of an amorphous power transformer core at room and liquid nitrogen temperature. *Journal of Physics: Conference Series*, 2014, vol. 507, 032018. DOI: 10.1088/1742-6596/507/3/032018.
- 5. Arun P. Application prospects of hybrid magnetic circuits in high frequency power transformers. *Techrxiv*, 2022. DOI: 10.36227/techrxiv.21737858.v1
- 6. Yingying W., Xingyu Z., Xu C. Influence of saturation levels on transformer equivalent circuit model. *Electrical Engineering*, 2021, vol. 72, no. 6, pp. 381–387.
- Yazdani-Asrami M., Gholamian S.A., Mirimani S.M. Influence of field-dependent critical current on harmonic AC loss analysis in HTS coils for superconducting transformers supplying non-linear loads. *Cryogenics*, 2021, vol. 113 (3), 103234. DOI: 10.1016/j.cryogenics.2020.103234
- 8. Grilli F., Ashworth S. Measuring transport AC losses in YBCO-coated conductor coils. *Superconductor Science and Technology*, 2007, vol. 20, pp. 794–799.
- 9. Lee S., Petrykin V., Molodyk A., Samoilenkov S., Kaul A., Vavilov A., Vysotsky V., Fetisov S. Development and production of second generation high Tc superconducting tapes at SuperOx and first tests of model cables. *Superconductor Science and Technology*, 2014, vol. 27, no. 4, Art. no. 044022.
- 10. Zhou J., Chan W., Schwartz J. Quench detection criteria for YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7</sub>-δ coils monitored via a distributed temperature sensor for 77 K cases. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2018, vol. 28, no. 5, Art. no. 4703012.
- 11. Hu M., Zhou Q.B., Wang X., Tang F.P., Sheng J., Bian X.Y., Jin Z.J. Study of liquid nitrogen insulation characteristics for superconducting transformers. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2022, vol. 32, no. 4, pp. 1–5, Art. no. 5500305.
- 12. Hellmann S., Abplanalp M., Elschner S., Kudymow A., Noe M. Current limitation experiments on a 1 mva-class superconducting current limiting transformer. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2019, vol. 29, no. 5. DOI: 10.1109/TASC.2019.2906804.
- 13. Lei W., Jiaojiao W., Tian Y., Xiaoning H., Fushou X., Yanzhong L. Film boiling heat transfer prediction of liquid nitrogen from different geometry heaters. *International Journal of Multiphase Flow*, 2020, vol. 129, no. 103294.
- 14. Zabarilo D.A. Features of the calculation of a high-frequency power transformer. *Bulletin of the Dnepropetrovsk National*. *University of Railway Transport*, 2013, vol. 3 (45), pp. 29–35. (In Russ.)
- 15. Starodubtsev Yu.N. Theory and calculation of a low-power transformer. Moscow, IP Radiosoft Publ., 2017. 320 p. (In Russ.)
- 16. Tikhomirov P.M. Calculation of transformers. Moscow, Alliance Publ., 2009. 528 p. (In Russ.)
- 17. Malcolm S. R. Experimental measurements of the skin effect and internal inductance at low frequencies. Article in Acta Technical CSAV (Ceskoslovensk Akademie Ved), 2015 vol. 60, pp. 51–69.
- 18. Coufal O. One hundred and fifty years of skin effect. Applied Sciences, 2023, vol. 13, no. 22. DOI: 10.3390/app132212416.
- 19. Corcoran J., Nagy P.B. Compensation of the skin effect in low-frequency potential drop measurements. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 2016, vol. 35, no. 4. DOI: 10.1007/s10921-016-0374-4.
- 20. *ELCUT: modeling of electromagnetic, thermal and elastic fields by the finite element method. Version 6.6.* St. Petersburg, Publishing solutions Publ., 2023. 290 p. (In Russ.)
- 21. TS 14-123-215-2009 magnetic tape pipelines made of soft magnetic amorphous alloys and soft magnetic composite material (nanocrystalline alloy). Asha, PJSC "Ashinsky Metallurgical Plant" Publ., 2011. 15 p. (In Russ.)
- Lenke R.U., Rohde S., Mura F., De Doncker R.W. Characterization of amorphous iron distribution transformer core for use in high-power medium-frequency applications. *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*. San Jose, CA, USA, 2009. DOI: 10.1109/ECCE.2009.5316134.
- Kurita N., Nishimizu A., Kobayashi C., Tanaka Y., Yamagishi A., Ogi M. Magnetic properties of simultaneously excited amorphous and silicon steel hybrid cores for higher efficiency distribution transformers. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2018, vol. 54, no. 11. DOI: 10.1109/TMAG.2018.2835498.
- 24. Elgamli E., Anayi F. Advancements in electrical steels: a comprehensive review of microstructure, loss analysis, magnetic properties, alloying elements, and the influence of coatings. *Applied Sciences*, 2023, vol. 13, no. 18. p. 10283. DOI: 10.3390/app131810283.
- 25. Azuma D., Ito N., Ohta M. Recent progress in Fe-based amorphous and nanocrystalline soft magnetic materials. *Journal of magnetism and magnetic materials*, 2020, vol. 501. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2019.166373
- 26. Suzuki K., Fujimori H., Hashimoto K. *Amorphous metals*. Ed. by Ts. Masumoto. Translated from Japanese. Japan, Metallurgy Publ., 1987. 328 p.
- 27. Pejush C.S., Youguang G., Hai Y.L., Jian G.Z. Measurement modelling of rotational core loss of fe-based amorphous magnetic material under 2-d magnetic excitation. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2021, pp. (99):1-1. DOI: 10.1109/TMAG.2021.3111498
- 28. Manusov V.Z., Galeev R.G. Estimation of parameters of a superconducting hybrid transformer with a spatial magnetic system. *Electricity*, 2024, no. 12, pp. 15–26. (In Russ.) DOI: 10.24160/0013-5380-2024-12-15-26.
- 29. Kang J., Lee H., Kang H. Dielectric Characteristics of liquid nitrogen according to the electrode material. *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*, 2015, no. 28 (3), pp. 1167–1173. DOI: 10.1007/s10948-014-2677-y.
- 30. Obukhov S.G., Beloglazkin A.O. Engineering methodology for designing power supply systems for autonomous energy-efficient buildings based on renewable energy sources. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2023. vol. 334, no. 1, pp. 30–42. (In Russ.) DOI: 10.18799/24131830/2023/1/3900

- 31. Ibrahim M., Pillay P. Core loss prediction in electrical machine laminations considering skin effect and minor hysteresis loops. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2013, vol. 49, no. 5, pp. 2061–2068. DOI: 10.1109/TIA.2013.2260852.
- Jaroszynski L., Wojtasiewicz G., Janowski T. Considerations of 2G HTS Transformer Temperature During Short Circuit. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2018, vol. 28, no. 4. DOI: 10.1109/TASC.2018.2806561.
- Sarker P.C., Md. Islam R., Guo Y., Zhu J., Lu H.Y. State of art technologies for development of high frequency transformers with advanced magnetic materials. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2019, vol. 29, no. 2. DOI: 10.1109/TASC.2018.2882411.
- 34. Oliveira S.V.G., Barbi I. A three-phase step-up DC-DC converter with a three-phase high frequency transformer. *Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, 2005. DOI: 10.1109/ISIE.2005.1528980.
- 35. Nanato N., Adachi T., Yamanishi T. Development of single-phase bi2223 high temperature superconducting transformer with protection system for high frequency and large current source. *Journal of Physics: Conference Series, vol. 1293. 31st International Symposium on Superconductivity (ISS2018).* Tsukuba, Ibaraki, Japan, 12–14 December 2018. DOI: 10.1088/1742-6596/1293/1/012072.
- 36. Kondratowicz-Kucewicz B., Wojtasiewicz G. The proposal of a transformer model with winding made of parallel 2g HTS tapes with transpositioners and its contact cooling system. *IEEE Transactions Applied Superconductivity*, 2018, vol. 28, no. 4. DOI: 10.1109/TASC.2018.2807585.

#### Information about the authors

**Ratmir G. Galeev**, Assistant, Novosibirsk State Technical University, 20, Karl Marx avenue, Novosibirsk, 630073, Russian Federation. galeew.ratmir@yandex.ru orcid.org/0009-0004-0485-6786

**Vadim Z. Manusov**, Dr. Sc., Professor, Yugra State University, 16, Chekhov street, Khanty-Mansiysk, 628011, Russian Federation. manusov36@mail.ru orcid.org/0000-0001-7799-4830

**Evgeny N. Larkin**, Postgraduate Student, Siberian State University of Water Transport, 33, Shchetinkin street, Novosibirsk, 630099, Russian Federation. hade876@yandex.ru

Received: 08.10.2024 Revised: 14.11.2024 Accepted: 24.01.2025

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Arun P. Practical study of mixed-core high frequency power transformer // Magnetism. 2022. № 2. P. 306–327. DOI: 10.3390/2030022
- Chan H.L., Cheng K.W.E., Sutanto D. Calculation of inductances of high frequency air-core transformers with superconductor windings for DC-DC converters // IEE Proceedings: Electric Power Applications. – 2003. – Vol. 150. – № 4. – P. 447–454. DOI: doi.org/10.1049/ip-epa:20030257.
- 3. Experimental and numerical study of high frequency superconducting air-core transformer / G. Liu, G. Zhang, G. Liu, H. Wang, L. Jing // Superconducting Science Technology. 2021. Vol. 34. № 8. Art. no. 85011.
- Pronto A.G., Maurício A., Pina J.M. Magnetic properties measurement and discussion of an amorphous power transformer core at room and liquid nitrogen temperature // Journal of Physics: Conference Series. – 2014. – Vol. 507. – 032018. DOI: 10.1088/1742-6596/507/3/032018.
- 5. Arun P. Application prospects of hybrid magnetic circuits in high frequency power transformers // Techrxiv. 2022. DOI: 10.36227/techrxiv.21737858.v1
- Yingying W., Xingyu Z., Xu C. Influence of saturation levels on transformer equivalent circuit model // Electrical Engineering. 2021. – Vol. 72. – № 6. – Р. 381–387.
- Yazdani-Asrami M., Gholamian S.A., Mirimani S.M. Influence of field-dependent critical current on harmonic AC loss analysis in HTS coils for superconducting transformers supplying non-linear loads // Cryogenics. – 2021. – Vol. 113 (3). – 103234. DOI: 10.1016/j.cryogenics.2020.103234
- 8. Grilli F., Ashworth S. Measuring transport AC losses in YBCO-coated conductor coils // Superconductor Science and Technology. 2007. Vol. 20. P. 794-799.
- Development and production of second generation high Tc superconducting tapes at SuperOx and first tests of model cables / S. Lee, V. Petrykin, A. Molodyk, S. Samoilenkov, A. Kaul, A. Vavilov, V. Vysotsky, S. Fetisov // Superconductor Science and Technology. – 2014. – Vol. 27. – № 4. – Art. no. 044022.
- 10. Zhou J., Chan W., Schwartz J. Quench detection criteria for YBa2Cu3O7-δ coils monitored via a distributed temperature sensor for 77 K cases // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. 2018. Vol. 28. № 5. Art. no. 4703012.
- Study of liquid nitrogen insulation characteristics for superconducting transformers / M. Hu, Q.B. Zhou, X. Wang, F.P. Tang, J. Sheng, X.Y. Bian, Z.J. Jin // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2022. – Vol. 32. – № 4. – P. 1–5. – Art. no. 5500305.
- Current limitation experiments on a 1 mva-class superconducting current limiting transformer / H S. Ellmann, M. Abplanalp, S. Elschner, A. Kudymow, M. Noe // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2019. – Vol. 29. – № 5. DOI: 10.1109/TASC.2019.2906804.
- 13. Film boiling heat transfer prediction of liquid nitrogen from different geometry heaters / W. Lei, W. Jiaojiao, Y. Tian, H. Xiaoning, X. Fushou, L. Yanzhong // International Journal of Multiphase Flow. 2020. Vol. 129. № 103294.
- 14. Забарило Д.А. Особенности расчета силового трансформатора повышенной частоты // Наука та прогресс транспорту. 2013. № 3 (45). С. 29–35.
- 15. Стародубцев Ю.Н. Теория и расчет трансформаторов малой мощности. М.: ИП Радиософт, 2017. 320 с.
- 16. Тихомиров П.М. Расчет трансформаторов. М.: М. Альянс, 2009. 528 с.

- 17. Malcolm S.R. Experimental measurements of the skin effect and internal inductance at low frequencies // Article in Acta Technical CSAV (Ceskoslovensk Akademie Ved). 2015. Vol. 60. P. 51-69.
- 18. Coufal O. One hundred and fifty years of skin effect // Applied Sciences. 2023. Vol. 13. № 22. DOI: 10.3390/app132212416.
- 19. Corcoran J., Nagy P.B. Compensation of the skin effect in low-frequency potential drop measurements // Journal of Nondestructive Evaluation. 2016. Vol. 35. № 4. DOI: 10.1007/s10921-016-0374-4.
- 20. ELCUT: Моделирование электромагнитных, тепловых и упругих полей методом конечных элементов. Версия 6.6. Руководство пользователя. – Издательские решения, 2023. – 290 с.
- 21. ТУ 14-123-215-2009 Магнитопроводы ленточные из магнитомягких аморфных сплавов и магнитомягкого компазиционного материала (нанокристаллического сплава). Аша: ПАО «Ашинский металургическиз завод», 2011. 15 с.
- 22. Characterization of amorphous iron distribution transformer core for use in high-power medium-frequency applications / R.U. Lenke, S. Rohde, F. Mura, R.W. de Doncker // IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. San Jose, CA, USA, 2009. DOI: 10.1109/ECCE.2009.5316134.
- 23. Magnetic properties of simultaneously excited amorphous and silicon steel hybrid cores for higher efficiency distribution transformers / N. Kurita, A. Nishimizu, C. Kobayashi, Y. Tanaka, A. Yamagishi, M. Ogi // IEEE Transactions on Magnetics. 2018. Vol. 54. № 11. DOI: 10.1109/TMAG.2018.2835498.
- 24. Elgamli E., Anayi F. Advancements in electrical steels: a comprehensive review of microstructure, loss analysis, magnetic properties, alloying elements, and the influence of coatings // Applied Sciences. 2023. Vol. 13. № 18. P. 10283. DOI: 10.3390/app131810283.
- Azuma D., Ito N., Ohta M. Recent progress in Fe-based amorphous and nanocrystalline soft magnetic materials // Journal of magnetism and magnetic materials. – 2020. – Vol. 501. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2019.166373
- 26. Suzuki K., Fujimori H., Hashimoto K. Amorphous metals / Ed. by Ts. Masumoto Translated from Japanese. Japan: Metallurgy Publ., 1987. 328 p.
- 27. Measurement modelling of rotational core loss of fe-based amorphous magnetic material under 2-d magnetic excitation / C.S. Pejush, G. Youguang, Y.L. Hai, G.Z. Jian // IEEE Transactions on Magnetics. 2021. P. (99):1-1. DOI: 10.1109/TMAG.2021.3111498
- 28. Минусов В.З. Галеев Р.Г. Оценка параметров сверхпроводящего гибридного трансформатора с пространственной магнитной системой // Электричество. 2024. № 12. С. 15–26. DOI: 10.24160/0013-5380-2024-12-15-26.
- 29. Kang J., Lee H., Kang H. Dielectric characteristics of liquid nitrogen according to the electrode material // Journal of Superconductivity and Novel Magnetism. 2015. № 28 (3). P. 1167–1173. DOI: 10.1007/s10948-014-2677-y.
- 30. Обухов С.Г., Давыдов Д.Ю., Белоглазкин А.О. Инженерная методика проектирования систем электроснабжения автономных энергоэффективных зданийна основе возобновляемых источников энергии // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2023. Т. 334. № 1. С. 30–42. DOI: 10.18799/24131830/2023/1/3900.
- 31. Ibrahim M., Pillay P. Core loss prediction in electrical machine laminations considering skin effect and minor hysteresis loops // IEEE Transactions on Industry Applications. 2013. Vol. 49. № 5. P. 2061–2068. DOI: 10.1109/TIA.2013.2260852.
- 32. Jaroszynski L., Wojtasiewicz G., Janowski T. Considerations of 2G HTS transformer temperature during short circuit // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. 2018. Vol. 28. № 4. DOI: 10.1109/TASC.2018.2806561.
- 33. State of art technologies for development of high frequency transformers with advanced magnetic materials / P.C. Sarker, Md.R. Islam, Y. Guo, J. Zhu, H.Y. Lu // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. 2019. Vol. 29. № 2. DOI: 10.1109/TASC.2018.2882411.
- 34. Oliveira S.V.G., Barbi I. A three-phase step-up DC-DC converter with a three-phase high frequency transformer // Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics. 2005. DOI: 10.1109/ISIE.2005.1528980.
- 35. Nanato N., Adachi T., Yamanishi T. Development of single-phase bi2223 high temperature superconducting transformer with protection system for high frequency and large current source // Journal of Physics: Conference Series. Vol. 1293. 31st International Symposium on Superconductivity (ISS2018). – Tsukuba, Ibaraki, Japan, 12–14, 2018. DOI: 10.1088/1742-6596/1293/1/012072.
- 36. Kondratowicz-Kucewicz B., Wojtasiewicz G. The proposal of a transformer model with winding made of parallel 2g HTS tapes with transpositioners and its contact cooling system // IEEE Transactions Applied Superconductivity. 2018. Vol. 28. № 4. DOI: 10.1109/TASC.2018.2807585.

#### Информация об авторах

**Ратмир Гаязович Галеев**, ассистент кафедры теоретических основ электротехники, Новосибирский государственный технический университет, Россия, 630073, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. galeew.ratmir@yandex.ru orcid.org/0009-0004-0485-6786

**Вадим Зиновьевич Манусов**, доктор технических наук, профессор, профессор физико-математической школы, Югорский государственный университет, Россия, 628011, г. Ханты-Мансийск, ул. Чехова, 16. manusov36@mail.ru

**Евгений Николаевич Ларкин**, аспирант кафедры электрооборудования и автоматики, Сибирский государственный университет водного транспорта, Россия, 630099, г. Новосибирск, ул. Щетинкина, 33. shade876@yandex.ru

Поступила в редакцию: 08.10.2024 Поступила после рецензирования: 14.11.2024 Принята к публикации: 24.01.2025 УДК 621.311 DOI: 10.18799/24131830/2025/5/4903 Шифр специальности ВАК: 2.4.3, 2.4.5 Научная статья

# Размещение распределительного пункта на генплане сборного пункта с учетом всего жизненного цикла газового месторождения

# Н.С. Батурин<sup>1⊠</sup>, И.М. Богачков<sup>2</sup>, Р.Н. Хамитов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Омский государственный технический университет, Россия, г. Омск <sup>2</sup> Тюменский индустриальный университет, Россия, г. Тюмень

#### <sup>™</sup>nbaturin13@gmail.com

Аннотация. Актуальность исследования обусловлена необходимостью расположения главного распределительного пункта на генеральном плане сборного пункта при проектировании газовых месторождений. В течение жизненного цикла месторождения происходит увеличение электрических нагрузок и изменение характера их распределения, поэтому при выборе месторасположения главного распределительного пункта необходимо учитывать данное обстоятельство. Цель: принятие решения по размещению главного распределительного пункта на генеральном плане сборного пункта, используя методику расчета центра электрических нагрузок на I, II, III этапах жизненного цикла газового месторождения. Объект: второй участок Ачимовских отложений Уренгойского нефтегазоконденсатного месторождения. Методы: математическое моделирование, статистический анализ. Результаты и выводы. В результате проведенного анализа литературы определены состав сооружений и нагрузки электрических приемников. Построены картограммы нагрузок на плане газового месторождения с графическим изображением центра электрических нагрузок, а также показательные функции нагрузок электрических приемников и соответствующие карты линий уровня показательной функции для каждого этапа жизненного цикла. Произведена аналитическая оценка изменения характера распределения электрических нагрузок и смещения центра электрических нагрузок. На завершающем этапе принято решение по расположению главного распределительного пункта на генеральном плане сборного пункта, опираясь на расчеты центра электрических нагрузок на каждом этапе жизненного цикла газового месторождения. Выполнено технико-экономическое сравнение системы электроснабжения газовых месторождений с учетом центра электрических нагрузок в динамике, и системы электроснабжения без учета центра электрических нагрузок. Полученные результаты свидетельствуют о возможности выбора месторасположения главного распределительного пункта на площадке сборного пункта при использовании методики расчета центра электрических нагрузок и необходимости учитывать изменение характера распределения нагрузок и развитие электросетевого хозяйства на протяжении всего жизненного цикла газового месторождения при проектировании системы электроснабжения для достижения наилучших технико-экономических показателей.

**Ключевые слова:** центр электрических нагрузок, картограмма электрических нагрузок, электроприемник, жизненный цикл, генеральный план, главный распределительный пункт, газовое месторождение

**Для цитирования:** Батурин Н.С., Богачков И.М., Хамитов Р.Н. Размещение распределительного пункта на генплане сборного пункта с учетом всего жизненного цикла газового месторождения // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 5. – С. 195–206. DOI: 10.18799/24131830/2025/5/4903

UDC 621.311 DOI: 10.18799/24131830/2025/5/4903 Scientific paper

# Distribution point placement on the general plan of the assembly point, taking into account the entire life cycle of a gas field

## N.S. Baturin<sup>1⊠</sup>, I.M. Bogachkov<sup>2</sup>, R.N. Khamitov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Omsk State Technical University, Omsk, Russia Federation <sup>2</sup> Tyumen Industrial University, Tyumen, Russia Federation

<sup>™</sup>nbaturin13@gmail.com

Abstract. Relevance. The necessity to locate the main distribution point on the general plan of the assembly point when designing gas fields. During the life cycle of the plant, there is an increase in electrical loads and a change in the nature of their distribution, therefore, when choosing the location of a hydraulic fracturing plant, this circumstance must be taken into account. Aim. To make a decision on the placement of the main distribution point on the general plan of the assembly point, using the methodology for calculating the center of electric loads at the I, II, III stages of the life cycle of a gas field. Object. The second site of the Achimov deposits of the Urengoy oil and gas condensate field. Methods. Mathematical modeling, statistical analysis. Results and conclusions. As a result of the analysis of the literature, the authors have determined the composition of structures and loads of electrical receivers and built the cartograms of loads on the gas field plan with a graphical representation of the center of electric loads. They constructed the potential functions of electrical receivers loads and corresponding line maps of the level of the indicative function for each stage of the life cycle. Cartogram and potential function showed the nature of the distribution of electrical loads and the displacement of the center of electric loads. At the final stage, an analytical assessment, based on the calculation of the center of electric loads at each stage of the life cycle of the gas field, indicated the best location of the main distribution point on the general plan of the assembly point. The authors carried out technical and economic comparison of the power supply system for gas fields taking into account the central power supply in dynamics, and the power supply system without taking into account the central power supply. The results obtained indicate the possibility of choosing the location of the main distribution point at the assembly point site, using the method of calculating the center of electric loads. It is necessary to take into account the change in the nature of load distribution and the development of the electric grid throughout the entire life cycle of the gas field. When designing a power supply system, this will allow achieving better technical and economic indicators.

**Keywords:** electric load center, cartogram of electric loads, electric receiver, life cycle, general plan, main distribution point, gas field

**For citation:** Baturin N.S., Bogachkov I.M., Khamitov R.N. Distribution point placement on the general plan of the assembly point, taking into account the entire life cycle of a gas field. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 5, pp. 195–206. DOI: 10.18799/24131830/2025/5/4903

#### Введение

В процессе проектирования системы электроснабжения газовых месторождений встает вопрос расположения распределительного главного устройства на генеральном плане сборного пункта газового месторождения [1, 2]. Однако на сегодняшний день отсутствуют четкие требования и методики по определению места установки распределительных пунктов на площадке газового месторождения. Одним из возможных вариантов экономически и технически выгодного позиционирования главного распределительного пункта (ГРП) на территории сборного пункта (СП) является расположение с наименьшей удаленностью от центра электрических нагрузок (ЦЭН) [2-4].

Расчет ЦЭН производится с применением различных методов, в которых ЦЭН – координаты наивыгоднейшего места расположения источника питания [1–9]. При этом принимается условие, что нагрузки электрических приемников (ЭП) являются фиксированными величинами, вследствие чего ЦЭН является неподвижной точкой на генеральном плане месторождения.

Однако правилами разработки газовых месторождений, регламентируемых ГОСТ Р 55415-2013 [10], выделяется четыре периода жизненного цикла по уровню добычи газа: нарастающая добыча, постоянная добыча, падающая добыча и ликвидация месторождения. В связи с этим происходит изменение технологического процесса и, соответственно, электрических нагрузок на каждом этапе жизненного цикла. Вследствие данных процессов происходит смещение координат ЦЭН, что не учитывается при проектировании и негативно влияет на технико-экономические характеристики системы электроснабжения, в том числе и на место расположения ГРП на генплане СП.

Разработка проектной документации в части системы электроснабжения без учета перспективы изменения электрических нагрузок ведет к тому, что на этапе падающей добычи питающие и распределительные сети не отвечают новым условиям, что требует реконструкции, где основной проблемой становится изменение положения главной распределительной подстанции и переход на иной класс напряжения [5, 10-13]. Если проблема необходимости перехода на другой класс напряжения изучена и подробно рассмотрена [2, 11-17], то проблеме выбора расположения ГРП на генплане СП с учетом смещения ЦЭН в течение жизненного цикла газового месторождения, как показывает анализ источников литературы, до сих пор не уделялось достаточного внимания.

#### Объект и методика исследования

Общая идея исследования основана на использовании методики определения ЦЭН для принятия решения о месте размещения ГРП на генеральном плане СП с учетом всего жизненного цикла газового месторождения. В ходе исследования выполнен ряд задач: 1) определены состав сооружений и мощность электроприемников на каждом этапе жизненного цикла месторождения; 2) построены картограммы нагрузок на плане газового месторождения с графическим изображением ЦЭН, а также показательные функции нагрузок ЭП и соответствующие карты линий уровня показательных функций для каждого этапа жизненного цикла; 3) определены зоны рассеяния на протяжении жизненного цикла рассматриваемого месторождения; 4) принято решение о размещении ГРП на генплане СП; 5) проведено технико-экономическое сравнение двух вариантов распределительной сети газового месторождения: размещение ГРП с учетом динамики ЦЭН и размещение ГРП без учета ЦЭН.

С учетом этого в качестве объекта исследования принят второй участок Ачимовских отложений Уренгойского нефтегазоконденсатного месторождения. Любое газовое месторождение включает в себя установку комплексной подготовки газа (УКПГ), аппараты воздушного охлаждения (АВО), газосборные сети (ГСС), кусты газовых скважин (КГС) [10, 11]. На первом этапе функционирования месторождения происходит ввод в эксплуатацию оборудования кустов газовых скважин и промысловых объектов. После выхода добывающего предприятия на заданные мощности по добыче сырья происходит постепенное снижение пластового давления, что приводит к снижению объемов добычи. Для поддержания объемов добываемых углеводородных ресурсов на втором этапе вводится дожимная компрессорная станция (ДКС). На третьем этапе происходит снижение мощности ДКС, что связано с установкой мобильных компрессорных установок (МКУ) на устьях КГС [11, 13, 18-20], и общее увеличение потребляемой мощности. Таким образом, на этапе падающей добычи происходит значительное увеличение электрической нагрузки на кустах газовых скважин и снижение потребляемой мощности на сборном пункте, который включает в себя УКПГ, АВО и ДКС. Данные преобразования ведут к изменению характера нагрузок всего газового промысла. В настоящий момент второй участок Ачимовских отложений Уренгойского НГКМ включает в себя 10 кустов газовых скважин, СП, который состоит из УКПГ и ДКС. Рассматриваемое месторождение находится на втором этапе жизненного цикла.

По данным о составе сооружений и мощности ЭП выполнялся расчет центра электрических нагрузок. Согласно методике А.А. Федорова, предложенной в [6], ЦЭН группы электрических приемников, расположенных в точках  $(x_i, y_i)$ , определяется по следующим формулам:

$$x_{0} = \frac{\sum_{i=1}^{n} P_{i} \cdot x_{i}}{\sum_{i=1}^{n} P_{i}}; y_{0} = \frac{\sum_{i=1}^{n} P_{i} \cdot y_{i}}{\sum_{i=1}^{n} P_{i}},$$
(1)

где n – количество приемников, шт.;  $P_i$  – мощность *i*-го электроприемника, кВт;  $x_i$ ,  $y_i$  – координаты расположения *i*-го электроприемника, м.

Для наглядного представления характера распределения нагрузок по месторождению строилась картограмма нагрузок, которая представляет собой генплан газового промысла с нанесенными геометрическими изображениями средней интенсивности распределения нагрузок ЭП. Среди множества способов построения картограмм с изображением средней интенсивности распределения электрических нагрузок наиболее простым, наглядным и распространенным является способ построения окружностей, где в качестве центра окружности принимают ЦЭН приемника, а радиус рассчитывают по следующей формуле:

$$r_i = \sqrt{\frac{P_i}{\pi \cdot m}},\tag{2}$$

где *m* – масштаб, *m*=1000.

Поскольку газовый промысел имеет в своем составе множество КГС, которые являются приемниками электрической энергии, встает вопрос о разделении их на группы. Каждая группа ЭП должна питаться из своего центра. Получить области расположения ЦЭН для каждой группы на картограмме нагрузок можно, используя метод потенциальных функций [6]. Основная идея метода заключается в проведении аналогии между нагрузками ЭП и потенциалами некоторых источников энергии, которые расположены в тех же точках и равны нагрузкам приемников. При переходе в иную точку потенциалы убывают. Существуют эквипотенциальные контуры, которые описываются значениями функции, определенной суммой потенциалов всех источников энергии. Расположение ЦЭН при этом определяют экстремумы потенциальной функции, а контуры позволяют разделять приемники на группы. Для построения картограммы нагрузок описанным выше методом использовалась формула показательной функции:

$$\Pi(x, y) = \sum_{i=1}^{n} P_i \cdot e^{-\beta \cdot [(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2]},$$
(3)

где <br/>  $\beta$  — параметр контрастности рельефа графика потенциальной функции, <br/>  $\beta{=}0{,}01.$ 

Особенность газовых месторождений заключается в постоянстве потребляемой электрической мощности в течение суток. Однако в течение года происходит изменение графика электрических нагрузок. Также эксплуатация газового промысла и поддержание объема извлекаемых ресурсов на необходимом уровне влечет изменение уровня электрических нагрузок на протяжении жизненного цикла. Из этого следует, что ЦЭН более корректно рассматривать не как стабильную точку на генплане месторождения, а как зону рассеяния ЦЭН.

Согласно методике А.А. Федорова, предложенной в [6], центр зоны рассеяния определяется при использовании формулы:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{t} x_0(t)}{T}; \ \bar{y} = \frac{\sum_{t} y_0(t)}{T},$$
 (4)

где  $x_0(t)$ ,  $y_0(t)$  – координаты расположения ЦЭН в t момент времени, м; T – количество расчетных моментов времени, T=3, шт.

По формуле (1) можно вычислить значение координат ЦЭН в каждый *t* момент времени. Количество расчетных периодов соответствует количеству этапов жизненного цикла газового месторождения.

Зона рассеяния характеризуется отклонениями ЦЭН от центра, рассчитанного по формуле (4) в момент времени *t*:

$$\delta x(t) = x_0(t) - \overline{x};$$
  

$$\delta y(t) = y_0(t) - \overline{y}.$$
(5)

Удобно использовать центральные моменты второго порядка отклонений:

$$N_{xx} = \frac{\sum_{t} \left(\delta x(t)\right)^{2}}{T}; N_{yy} = \frac{\sum_{t} \left(\delta y(t)\right)^{2}}{T}; \qquad (6)$$
$$N_{xy} = \frac{\sum_{t} \left(xy(t)\right) \cdot \left(\delta y(t)\right)}{T}.$$

Моменты  $N_{xx}$  и  $N_{yy}$  являются показателями разброса полученных по формуле (1) значений вдоль соответствующих осей. Момент  $N_{xy}$  представляет собой показатель связи отклонений  $\delta x(t)$  и  $\delta y(t)$ .

При повороте системы координат на угол α центральные моменты обладают свойством:

$$N'_{xx} = N_{xx} \cdot \cos^{2} \alpha + N_{xy} \cdot \sin 2\alpha + N_{yy} \cdot \sin^{2} \alpha;$$
  

$$N'_{yy} = N_{yy} \cdot \sin^{2} \alpha - N_{xy} \cdot \sin 2\alpha + N_{yy} \cdot \cos^{2} \alpha;$$
 (7)  

$$N'_{xy} = \frac{1}{2} \left( N_{yy} - N_{xx} \right) \cdot \sin 2\alpha + N_{xy} \cdot \cos 2\alpha.$$

Эллипс отклонений ЦЭН, характеризующий зону рассеяния ЦЭН, определяется по следующей формуле:

$$N_{yy}\delta x^2 - 2N_{xy}\delta x\delta y + N_{xx}\delta y^2 = N'_{yy}r^2, \qquad (8)$$

где *г* – длина радиус-вектора, м.

Направление зоны рассеяния определялось с помощью выражения:

$$tg2\varphi = \frac{2N_{xy}}{N_{xx} - N_{yy}}.$$
(9)

Выражение (9) показывает, что направления показателей разброса располагаются перпендикулярно:

$$\varphi_2 = \varphi_1 + \frac{\pi}{2}.\tag{10}$$

Замена угла α в выражении (7) на угол φ из формулы (9) позволяет определить выражение показателей разброса через исходные компоненты при повороте системы координат:

$$N_{11} = \frac{N_{xx} + N_{yy}}{2} + \frac{1}{2}\sqrt{\left(N_{xx} - N_{yy}\right)^{2} + 4N_{xy}^{2}};$$

$$N_{22} = \frac{N_{xx} + N_{yy}}{2} - \frac{1}{2}\sqrt{\left(N_{xx} - N_{yy}\right)^{2} + 4N_{xy}^{2}}.$$
(11)

Уравнение эллипса имеет вид:

$$\frac{\delta x^2}{N_{11}} + \frac{\delta y^2}{N_{22}} = \lambda.$$
 (12)

В свою очередь λ является величиной постоянной и определяется по формуле:

$$\lambda = \frac{N'_{yy} r^2}{N_{11} N_{22}}.$$
 (13)

Тогда величины полуосей эллипса:

$$a = \sqrt{\lambda N_{11}}; \ b = \sqrt{\lambda N_{22}}.$$
 (14)

Формулы (4)–(14) позволяют построить зону рассеяния ЦЭН и решить одну из задач динамического проектирования системы электроснабжения газового месторождения.

#### Результаты исследования и их обсуждение

В табл. 1 представлен перечень сооружений с указанием величины электрических нагрузок, которые приняты с учетом компенсации реактивной мощности на стороне низкого напряжения, для этапа III указаны прогнозируемые значения. В связи с незначительной величиной реактивных нагрузок для них расчетом ЦЭН и построением картограммы нагрузок допустимо пренебречь.

С использованием полученных в табл. 1 данных и формул (1), (2) произведены расчеты ЦЭН для каждого этапа жизненного цикла газового месторождения с радиальной схемой системы электроснабжения. Построены картограммы и центры электрических нагрузок, которые представлены на рис. 1.



**Puc. 1.** Картограммы нагрузок для I (а), II (б), III (в) этапов жизненного цикла газового месторождения **Fig. 1.** Load cartograms for the I (а), II (b), III (c) stages of the life cycle of a gas birthplace

<b>Tuble 1.</b> Composition of structures with their design capacities (r) and coordinates (x, y)									
Электроприемник	Эле	ектрическая нагрузк	Координаты, м						
Power receiver		Coordin	lates, m						
i ower receiver	Этап/Stage I	Этап/Stage II	Этап/Stage III	X	у				
КГС 1/Well pad 1	97,5	97,5	991	4882,067	12306,66				
КГС 2/Well pad 2	98	98	989	5843,085	6214,786				
КГС 3/Well pad 3	96,4	96,4	992	8869,838	15590,51				
КГС 4/Well pad 4	99	99	997	9236,178	8059,698				
КГС 5/Well pad 5	94	94	975	10536,33	3263,917				
КГС 6/Well pad 6	99	99	993	11021,94	12571,34				
КГС 7/Well pad 7	97	97	978	13258,59	6643,585				
КГС 8/Well pad 8	95,5	95,5	981	16031,9	11083,49				
КГС 9/Well pad 9	99,8	99,8	994	16090,79	14283,49				
КГС 10/Well pad 10	95	95	962	17524,4	7038,379				
УКПГ/GPP	1986	1986	1986	9949,235	6235,253				
ДКС/ВСS	-	1921	988,5	9949,235	6235,253				
Итог по промыслу/Fishing total	2957,2	4920,2	12826,5	-	_				

**Таблица 1.** Состав сооружений с их расчетными мощностями (Р) и координатами (х, у) **Table 1.** Composition of structures with their desian capacities (Р) and coordinates (х, у)

Построенные потенциальные функции нагрузок приемников газового месторождения по формуле (3) для каждого этапа жизненного цикла представлены на рис. 2.

Построены карты линий уровня потенциальных функций нагрузок приемников для I, II, III этапов жизненного цикла газового месторождения для определения экстремума функции в плоскости *x*, *y*. Построенные карты линий уровня потенциальных функций представлены на рис. 3. Параметр контрастности рельефа β при построении потенциальных функций нагрузок приемников и карт линий уровня влияет на количество групп электроприемников, получаемых на генплане. При низких значениях этого параметра получается большое количество групп, где в группе может быть один ЭП. Низкое значение контрастности рельефа принято с целью наглядно показать изменение характера распределения нагрузки на III этапе жизненного цикла газового месторождения.



**Рис. 2.** Потенциальные функции нагрузок приемников для I, II, III этапов жизненного цикла газового месторождения **Fig. 2.** Potential functions of receiver loads for the I, II, III stages of the gas field life cycle



**Рис. 3.** Карты линий уровня потенциальных функций нагрузок приемников для I, II, III этапов жизненного цикла газового месторождения



Для получения наглядной картины изменения характера распределения нагрузок по объектам газового месторождения на каждом этапе построен график показательной функции в плоскости *x*, P и представлен на рис. 4.



**Рис. 4.** Проекция потенциальных функций нагрузок приемников для I, II, III этапов жизненного цикла газового месторождения

*Fig. 4.* Projection of potential functions of receiver loads for stages I, II, III of the life cycle of a gas field

Полученные графики функций показывают, что ЦЭН, определенный по формуле (1), совпадает с экстремумом функции, которая описывается формулой (3). Следовательно, определение ЦЭН допустимо при применении построения картограммы нагрузок как по формуле (1), так и по формуле (3). Однако формула (3) также позволяет разбить ЭП по группам и определить необходимое количество источников питания.

На основании полученных картограмм нагрузок можно произвести аналитическую оценку изменения нагрузок и смещения ЦЭН в течении всего жизненного цикла газового месторождения.

Из анализа рис. 1 видно, что на первых двух этапах жизненного цикла месторождения нагрузка на КГС не изменяется, соответственно, радиусы окружностей, характеризующих среднюю интенсивность распределения нагрузок, также не изменяются, остается постоянной и амплитуда показательной функции, характеризующая величину нагрузки. Нагрузка на СП увеличивается, и вместе с этим увеличивается радиус окружности и амплитуда графика на рис. 2, 4.

На этапе падающей добычи происходит увеличение радиусов окружностей КГС на рис. 1 и увеличение амплитуды на рис. 2, 4, что показывает увеличение нагрузки, которая объясняется установкой МКУ на устьях скважин. В этот момент происходит уменьшение нагрузки на СП, о чем говорит уменьшение радиуса окружности СП на рис. 1 и амплитуды на рис. 2, 4. Таким образом, происходит перераспределение нагрузок в течение всего жизненного цикла газового месторождения. Особенно значимым является изменение характера распределения нагрузок на третьем этапе, так как происходит смещение величины мощности в сторону кустов скважин и уменьшение мощности на УКПГ, что наглядно показывает график, изображенный на рис. 4.

Изменение характера распределения нагрузок непременно вызывает изменение ЦЭН. На картограммах нагрузок, которые представлены на рис. 1, видно, что на всех этапах происходит увеличение радиуса окружности, характеризующего ЦЭН, что говорит о постоянном росте величины электрических нагрузок.

Из анализа полученных графиков нагрузок видно, что происходит смещение ЦЭН. Расстояние, на которое происходит смещение, занесено в табл. 2.

**Таблица 2.** Смещение и координаты центра электрических нагрузок

Table 2.	Displacement and coordinates of the center of
	electrical loads (CEL)

Номер	Координаты ЦЭН, CEL coordinates, n Номер		Смещение относительно СП Displacement	іие ЦЭН lacement	жности ЦЭН dius CEL
Stage number	X	у	relative to assem- bly point (AP)	Смещен CEL displ	Радиус окру Circle ra
			км/kr	n	
Ι	10397,207	7385,840	1,24	-	0,97
II	10117,401	6667,187	0,46	-0,77	1,25
III	10968,178	8858,523	2,81	2,35	2,02

Из табл. 2 и картограмм нагрузок на рис. 1 видно, что смещение ЦЭН на втором этапе происходит в сторону СП и является незначительным (770 м), однако на третьем этапе происходит значительное смещение (2350 м) в обратном направлении и увеличение радиуса окружности. Это показывает, что происходит значительное изменение характера распределения нагрузок. Как уже говорилось выше, это приводит к увеличению потерь напряжения и электрической мощности, а также к тому, что условие экономической и технической целесообразности системы электроснабжения нарушается.

Принимая во внимание изменение характера распределения нагрузок, на основании формул (4)–(10) получены эллипсы, характеризующие зону рассеяния ЦЭН на протяжении всего жизненного цикла газового месторождения. Зона рассеяния нанесена на план месторождения и показана на рис. 5.



**Рис. 5.** Генплан газового месторождения с зоной рассеяния ЦЭН

Fig. 5. General plan of the gas field with the CEL dispersion zone

На рис. 5 в область, ограниченную эллипсом, попадают рассчитанные как статическая точка на генплане ЦЭН для I, II, III этапов, это говорит о том, что в результате расчета учтены возможные варианты смещения центров нагрузок с течением времени.

В результате расчета ЦЭН на каждом этапе жизненного цикла газового месторождения и построения зоны рассеяния становится возможным принять решение о наиболее выгодном расположении ГРП на генеральном плане СП с экономической и технической точки зрения. На рис. 6 наглядно показано расположение ГРП на генеральном плане СП. На рис. 6, *а* показано расположение ГРП со стороны источника питания до определения ЦЭН. На рис. 6, *б* показан генплан после определения ЦЭН на каждом этапе жизненного цикла.

Зона рассеяния ЦЭН находится с северовосточной стороны относительно СП, там же находятся расчетные значения центров для каждого этапа жизненного цикла месторождения, поэтому ГРП следует расположить именно на этой стороне.

В результате проведенного исследования выделен ряд критериев, влияющих на выбор оптимального места расположения ГРП:

- уровень и характер электрических нагрузок;
- плотность электрических нагрузок распределения;
- динамика изменения электрических нагрузок;
- протяженность линий электропередачи;
- выбранный класс напряжения сети.

Таким образом, одним из аспектов практической ценности проведенного исследования является возможность на этапе проектирования газовых месторождений производить выбор оптимального места размещения ГРП на площадке сборного пункта газа с учетом перспективного и неизбежного роста электрических нагрузок на КГС.

Для подтверждения практической ценности исследования приведен пример расчета по потере напряжения (табл. 3) двух вариантов распределительной сети для первого и третьего этапов жизненного цикла месторождения.

Вариант 1 – классический вариант, выбор расположения ГРП осуществляется без учета динамики ЦЭН.

Вариант 2 – предлагаемый вариант, выбор расположения ГРП осуществляется с учётом динамики ЦЭН.



 Рис. 6.
 Генплан сборного пункта с расположением ГРП до определения ЦЭН (а), после определения ЦЭН (б)

 Fig. 6.
 General plan of the assembly point with the location of the main distribution point (MDP) before CEL determination (a), after CEL determination (b)

	Bapиaнт 1/Version 1			Bариант 2/Version 2			
II	Классический вариант/Classic version			Предлагаемый вариант/Offered version			
Номер куста Well pad no.	Длина ВЛ, км Dower line longth lum	Этап I, ∆U Stage I, ∆U	Этап III, ΔU Stage III, ΔU	Длина ВЛ, км Dower line longth lum	Этап I, ∆U Stage I, ∆U	Этап III, ΔU Stage III, ΔU	
	Fower line length, kin	%		Fower line length, kin	%		
КГСЗ Well pad 3	13,3	1,65	16,5	9,9	0,99	9,9	

**Таблица 3**. Расчет участка распределительной сети по вариантам **Table 3**. Calculation of the distribution network section by versions

В варианте 1 ГРП размещается на юго-западе площадки СП, протяженность воздушной линии (ВЛ) составляет 13,3 км до дальнего куста 3.

В варианте 2 ГРП размещается с учетом динамики ЦЭН на северо-востоке площадки СП, протяженность ВЛ в этом варианте составляет 9,9 км до дальнего куста 3.

При размещении ГРП в ЦЭН, который соответствует III этапу, происходит снижение длины магистральной ВЛ на 3,4 км по сравнению с вариантом 1. В результате расчета отклонений напряжения для варианта 1, когда не учитываются центр электрических нагрузок и их неизбежный рост, отклонение напряжения составило 16,5 % на завершающем этапе жизненного цикла. Данное отклонение нарушает требование ГОСТ 32144-2013, в котором допустимое отклонение напряжения не должно превышать 10 %. Для обеспечения электрической энергией потребителей КГС с учетом роста нагрузки следует выполнить реконструкции распределительной сети в следующих вариантах: или установить пункты автоматического регулирования напряжения (ПАРН), или выполнить замену проводов ВЛ с увеличением сечения проводника на всем участке.

Примером описанного случая, когда потребовалась реконструкция распределительной сети на этапе падающей добычи газа, является опыт разработки Вынгапуровского нефтегазоконденсатного месторождения, расположенного в Ямало-Ненецком автономном округе [13]. На Вынгапуровском месторождении на девяти КГС были введены МКУ единичной мощностью до 1 МВт (технология распределённого компримирования газа), таким образом в третьем периоде нагрузка на КГС увеличилась в 10 раз по сравнению с первым периодом. Для обеспечения электрической энергией потребовалась реконструкция существующей распределительной сети в следующем объеме:

- реконструкция ВЛ 6 кВ протяженностью 22 км;
- строительство нового ЗРУ 6 кВ 1 шт.;
- строительство пункта автоматического регулирования напряжения 6 кВ – 1 шт.

Как видно из табл. 3, наилучшим решением с технической точки зрения будет размещение ГРП с учетом динамики ЦЭН, так как отклонение напряжения в этом случае не превышает 9,9 %, что соответствует ГОСТ 32144-2013. Правильный выбор расположения ГРП позволил без реконструкции сети снизить потери напряжения на 6,6 % у потребителя.

Далее произведено упрощенное экономическое сравнение двух вариантов распределительной сети. В экономическом сравнении не учитывались эксплуатационные затраты (далее OPEX). Экономическое сравнение осуществляется по минимуму капитальных вложений (далее CAPEX) для двух вариантов с учетом всего жизненного цикла месторождения. CAPEX приняты по информации, предоставленной заводами-изготовителями оборудования. Результаты сравнения вариантов капиталовложений приведены в табл. 4.

Результаты сравнения САРЕХ, представленные в табл. 4, показывают, что САРЕХ выше для классического варианта (вариант 1), где не учитывается ЦЭН. Это связано с реконструкцией распределительной сети на III этапе жизненного цикла месторождения. Во втором варианте капитальные вложения на III этапе отсутствуют, так как требование по отклонению напряжения не нарушается и нет необходимости в реконструкции распределительной сети.

По результатам расчетов установка ПАРН является более экономичным способом сохранения требуемого уровня напряжения для классического варианта. Однако размещение ГРП с учетом динамики ЦЭН позволит сократить капитальные вложения при строительстве распределительной сети на 39,7 % и выполнить требования по качеству электрической энергии.

В случае реконструкции ВЛ в первом варианте эффект от принятия решения о размещении ГРП с учётом динамики ЦЭН будет еще выше. Предлагаемый вариант позволит снизить капиталовложения на 49,7 %.

1 ,	, ,	,	,	Ľ	, , 1		
Капитальные вложения Capital investments	Ед.	Характеристика	Вари	ант 1/Классиче Version 1/Classi	Вариант 2 Предлагаемый вариант Version 2 Offered version		
	изм. Unit	электроустановки Electrical installation characteristics	CAPEX I этап CAPEX stage I	CAPE CAPE Установка ПАРН AVR installa- tion	X III этап X stage III Реконструкция ВЛ Replacing power line wires	CAPEX I этап CAPEX stage I	CAPEX III этап CAPEX stage III
Одноцепная ВЛ 10 кВ Single-circuit power line 10 kV	КM	13,3	158,48	-	237,74	-	_
Single-circuit power line 10 kv	KIII	9,9	-	-	-	117,97	-
Распределительное устройство Switchgear	шт. рс.	1	163,27	-	-	163,27	-
Пункт автоматического регулиро- вания напряжения 10 кВ Automatic voltage regulator 10 kV	шт. рс.	1	-	144,51	_	-	_
Итог CAPEX на каждом этапе Total CAPEX at each stage	-	-	321,75	144,51	237,74	281,24	0
Всего САРЕХ с учетом всего жиз- ненного цикла месторождения	_	-	466,263* -		_	281 24	
entire life cycle of the field		_	-	-	559,49**		

Таблица 4.Сравнение стоимости капитальных вложений, в миллионах рублей без НДС, в ценах 01.12.2024Table 4.Comparison of the cost of capital investments, in millions of rubles excluding VAT, in prices 01.12.2024

Примечание: \* – сумма САРЕХ для классического варианта проектирования системы электроснабжения газовых месторождений с установкой ПАРН; \*\* – сумма САРЕХ для классического варианта проектирования системы электроснабжения газовых месторождений с реконструкцией ВЛ.

*Note:* \* is the CAPEX amount for the classical design of the gas field power supply system with the installation of AVR; \*\* is the CAPEX amount for the classical design of the gas field power supply system with power line reconstruction.

#### Заключение

Таким образом, определен состав сооружений и мощность нагрузки ЭП для второго участка Ачимовских отложений Уренгойского НГКМ, что позволило произвести расчет ЦЭН на каждом этапе жизненного цикла. Анализ полученных картограмм нагрузок и потенциальных функций позволил определить область смещения ЦЭН относительно сборного пункта в течение всего периода эксплуатации. Определение ЦЭН и анализ его смещения стали основой для принятия решения о наиболее выгодном с технической и экономической точки зрения размещении ГРП на генеральном плане сборного пункта.

При проектировании системы электроснабжения газового месторождения необходимо учитывать весь период жизненного цикла и выбирать место размещения ГРП с учетом динамики ЦЭН. Приведенный пример технико-экономического расчета двух вариантов распределительной сети (вариант 1 – классический вариант, выбор расположения ГРП осуществляется без учета динамики ЦЭН, вариант 2 – предлагаемый вариант, выбор расположения ГРП осуществляется с учётом динамики ЦЭН) показал, что вариант 2 позволил снизить потери напряжения в конце ВЛ на 6,6 % без установки дополнительных электрических аппаратов и реконструкции распределительной сети, а также снизить САРЕХ минимум на 39,7 %.

Таким образом, практическая ценность проведённого исследования очевидна.

Перспективное направление дальнейшего исследования в этом вопросе заключается в компенсации смещения ЦЭН с целью сохранения экономической и технической целесообразности системы электроснабжения. Одним из возможных способов решения данной проблемы является применение системы накопления электроэнергии [21–25]. Возможность применения данного способа на объектах газового месторождения более подробно будет рассмотрена в следующей статье.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Кудрин Б.И. Электроснабжение. М.: Академия, 2012. 352 с.
- Сибикин Ю.Д. Основы проектирования электроснабжения промышленных и гражданских зданий. М.: Директ-Медиа, 2016. – 508 с.
- 3. Мельников Н.А. Электрические сети и системы. М.: Энергия, 1975. 463 с.
- 4. Cebeci S., Baykoç Ö. Determining the optimal location of substations for electric distribution: a real application on a regional basis // Croatian operational research review. 2022. Vol. 13. P. 1–12. DOI: 10.17535/crorr.2022.0001.
- 5. Липкин Б.Ю. Электроснабжение промышленных предприятий и установок. М.: Высшая школа, 1990. 359 с.

- 6. Федоров А.А., Камнева В.В. Основы электроснабжения промышленных предприятий. М.: Энергоатомиздат, 1984. 386 с.
- 7. Косарев Б.А. Методики управления децентрализованными электротехническими системами с распределенной генерацией: дис. ... канд. техн. наук. Омск, 2020. 185 с.
- Динамическое перераспределение источников питания в электротехнической системе с распределенной генерацией / Б.А. Косарев, Г.А. Кощук, В.К. Федоров, Л.Г. Полынцев // Омский научный вестник. 2019. № 2 (164). С. 50–55. DOI: 10.25206/1813-8225-2019-164-50-55.
- 9. Mughal S., Sood Y. A novel approach for tracking the optimal location of a substation // International Journal of electronics and computers. 2011. Vol. 3. P. 1–5.
- 10. ГОСТ Р 55415-2013. Месторождения газовые, газоконденсатные, нефтегазовые и нефтегазоконденсатные. Правила разработки. М.: Стандартинформ, 2014. 31 с.
- Bogachkov I.M., Khamitov R.N., Frayshteter V.P. Estimation of electric loads dynamics in the gas fields of Western Siberia taking into account the life cycle of the fields // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2021. – Vol. 1118. – P. 012015. DOI: 10.1088/1757-899x/1118/1/012015.
- Development of probabilistic model of short-term power supply interruptions / V.R. Antropova, I.S. Sukhachev, A.S. Martyanov, V.V. Sushkov // Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines: Proc. of XV International IEEE Scientific and Technical Conference. – Omsk, 09–11 November 2021. – Omsk: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2021. – P. 1–5. DOI: 10.1109/Dynamics52735.2021.9653463
- 13. Богачков И.М. Поддержка принятия решения при выборе рационального напряжения системы электроснабжения газового месторождения с учетом его жизненного цикла: дис. ... канд. техн. наук. Омск, 2021. 195 с.
- 14. Ivanin O.A., Director L.B. The use of artificial neural networks for forecasting the electric demand of stand-alone consumers // Thermal Engineering. 2018. Vol. 65. № 5. P. 258–265. DOI: 10.1134/S004060151805004X.
- 15. Богачков И.М. Математические модели расчета оптимального напряжения системы внешнего электроснабжения газовых месторождений, полученные с применением теории планирования эксперимента // Электротехнические системы и комплексы. 2021. № 1 (50). С. 4–9. DOI: 10.18503/2311-8318-2021-1(50)-4-9.
- 16. Akhlaque A.K., Ahmad F.M. Different voltage selection criteria and insulation design of a transmission line for HF, EHV & UHV system // International Journal of Advanced Technology & Engineering Research (IJATER). 2012. Vol. 2. P. 73–79.
- 17. Technical and economic evaluation of voltage level in transmission network expansion planning using GA / S. Jalilzadeh, A. Kazemi, H. Shayeghi, M. Madavi // Energy Conversion and Management. 2008. Vol. 49. P. 1119–1125.
- 18. Огай В.А. Экономическая и энергетическая эффективность применения отечественных МКУ при добыче низконапорного Сеноманского газа // Научный форум. Сибирь. 2015. № 1. С. 59–61.
- 19. Ștefănescu D.-P., Maulidani O. Audrey B. Compressor application for extending production life cycle in mature fields // AGH Drilling, Oil, Gas. 2016. Vol. 33. P. 495. DOI: 10.3390/en17205061.
- 20. Alhajri F.M., Samsudin Z. Reviving of gas well using the mobile wellhead gas compressor technology // SPE Annual Technical Conference and Exhibition: Proc. of International Scientific and Technical Conference. – San Antonio, 16–18 October 2023. – San Antonio: Henry B. Gonzalez Convention Center, 2023. – P. 1–7. DOI: 10.2118/214957-MS.
- Optimal planning of HV/MV substation locations and sizes considering battery energy storage systems for peak shaving / X. Lu, W. Ouyang, Z. Wang, J. Zhou // Electrical Engineering. – 2024. – Vol. 106. – P. 1–9. DOI: 10.1007/s00202-024-02466-w.
- 22. Optimal configuration and operation analysis of solar-assisted natural gas distributed energy system with energy storage / Y. Ge, J. Han, Q. Ma, J. Feng // Energy. 2022. Vol. 246. P. 123429. DOI: 10.1016/j.energy.2022.123429.
- 23. Amiruddin A., Dargaville R. Gawler R. Optimal integration of renewable energy, energy storage, and Indonesia's super grid // Energies. 2024. Vol. 17. P. 5061. DOI: 10.3390/en17205061.
- 24. Лосев Ф.А., Сушков В.В. Поликритериальный подход к анализу мероприятий по повышению устойчивости узлов электродвигательной нагрузки нефтедобывающих предприятий // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2019. Т. 330. № 8. С. 55–64. DOI: 10.18799/24131830/2019/8/2212.
- 25. Повышение устойчивости погружных электродвигателей установок электрических центробежных насосов при провалах напряжения с помощью адаптивной защиты минимального напряжения / Ф.А. Лосев, В.В. Сушков, В.В. Тимошкин, А.С. Мартьянов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2018. Т. 329. № 10. С. 40–48.

#### Информация об авторах

**Никита Сергеевич Батурин**, аспирант кафедры холодильной и компрессорной техники и технологии Нефтехимического института, Омский государственный технический университет, Россия, 644050, г. Омск, пр. Мира, 11. NBaturin13@gmail.com; https://orcid.org/0009-0009-4847-3740

**Иван Михайлович Богачков**, кандидат технических наук, доцент кафедры электроэнергетики Тюменского индустриального университета, Россия, 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38. Bogim83@mail.ru; https://orcid.org/0000-0001-7222-4511

**Рустам Нуриманович Хамитов**, доктор технических наук, профессор кафедры электроэнергетики Института промышленных технологий и инжиниринга, Тюменский индустриальный университет, Россия, 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38. apple\_27@mail.ru; https://orcid.org/0000-0001-9876-5471

Поступила в редакцию: 20.11.2024 Поступила после рецензирования: 13.12.2024 Принята к публикации: 23.04.2025

#### REFERENCES

- 1. Kudrin B.I. Electricity supply. Moscow, Academiya Publ., 2012. 352 p. (In Russ.)
- 2. Sibikin Yu.D. Fundamentals of designing power supply for industrial and civil buildings. Moscow, Direct-Media Publ., 2016. 508 p. (In Russ.)
- 3. Melnikov N.A. Electrical networks and systems. Moscow, Energiya Publ., 1975. 463 p. (In Russ.)
- 4. Cebeci S., Baykoc O. Determining the optimal location of substations for electric distribution: a real application on a regional basis. *Croatian operational research review*, 2022, vol. 13, pp. 1–12. DOI: 10.17535/crorr.2022.0001.
- 5. Lipkin B.Yu. Power supply for industrial enterprises and installations. Moscow, Vyshaya shkola Publ., 1990. 359 p. (In Russ.)
- 6. Fedorov A.A., Kamneva V.V. Basics of power supply for industrial enterprises. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1984. 386 p. (In Russ.)
- 7. Kosarev B.A. Methods for managing decentralized electrical systems with distributed generation. Cand. Dis. Omsk, 2020. 185 p. (In Russ.)
- 8. Kosarev B.A., Koshchuk G.A., Fedorov V.K., Polyntsev L.G. Dynamic redistribution of power sources in an electrical system with distributed generation. *Omsk Scientific Bulletin*, 2019, vol. 2 (164), pp. 50–55. (In Russ.) DOI: 10.25206/1813-8225-2019-164-50-55.
- 9. Mughal S., Sood Y. A novel approach for tracking the optimal location of a substation. *International Journal of electronics and computers*, 2011, vol. 3, pp. 1–5.
- 10. SS R 55415-2013. Gas, gas condensate, oil and gas and oil and gas condensate fields. Development rules. Moscow, Standardinform Publ., 2014. 31 p. (In Russ.)
- 11. Bogachkov I.M., Khamitov R.N., Frayshteter V.P. Estimation of electric loads dynamics in the gas fields of Western Siberia taking into account the life cycle of the fields. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2021, vol. 1118. pp. 012015. DOI: 10.1088/1757-899x/1118/1/012015.
- Antropova V.R., Sukhachev I.S., Martyanov A.S., Sushkov V.V. Development of Probabilistic Model of Short-Term Power Supply Interruptions. *Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines. Proceedings of the XV International IEEE Scientific and Technical Conference.* Omsk, November 09–11, 2021. Omsk. Institute of Electrical and Electronics Engineers Publ., 2021. pp. 1–5. DOI: 10.1109/Dynamics52735.2021.9653463.
- 13. Bogachkov I.M. Decision support when choosing a rational voltage for the power supply system of a gas field, taking into account its life cycle. Cand. Diss. Omsk, 2021. 195 p. (In Russ.)
- 14. Ivanin O.A., Director L.B. The use of artificial neural networks for forecasting the electric demand of stand-alone consumers. *Thermal Engineering*, 2018. vol. 65, no. 5, pp. 258–265. DOI: 10.1134/S004060151805004X.
- 15. Bogachkov I.M. Mathematical models for calculating the optimal voltage of the external power supply system for gas fields, obtained using the theory of experiment planning. *Electrical systems and complexes*, 2021, vol. 1 (50), pp. 4–9. (In Russ.) DOI: 10.18503/2311-8318-2021-1(50)-4-9.
- 16. Akhlaque A.K., Ahmad F.M. Different voltage selection criteria and insulation design of a transmission line for HF, EHV & UHV system. *International Journal of Advanced Technology & Engineering Research (IJATER)*, 2012, vol. 2, pp. 73–79.
- 17. Jalilzadeh S., Kazemi A., Shayeghi H., Madavi M. Technical and economic evaluation of voltage level in transmission network expansion planning using GA. *Energy Conversion and Management*, 2008, vol. 49, pp. 1119–1125.
- 18. Ogai V.A. Economic and energy efficiency of using domestic MCU in the production of low-pressure Cenomanian gas. *Scientific forum. Siberia*, 215, vol. 1, pp. 59–61. (In Russ.)
- 19. Stefănescu D.-P., Maulidani O. Audrey B. Compressor application for extending production life cycle in mature fields. *AGH Drilling, Oil, Gas*, 2016, vol. 33, pp. 495. DOI: 10.3390/en17205061.
- Alhajri F.M., Samsudin Z. Reviving of gas well using the mobile wellhead gas compressor technology. SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Proc. of the International Scientific and Technical Conference. San Antonio, October 16–18, 2023. San Antonio, SPE Journal Publ., 2023. pp. 1–7. DOI: 10.2118/214957-MS.
- 21. Lu X., Ouyang W., Wang Z., Zhou J. Optimal planning of HV/MV substation locations and sizes considering battery energy storage systems for peak shaving. *Electrical Engineering*, 2024, vol. 106, pp. 1–9. DOI: 10.1007/s00202-024-02466-w.
- 22. Ge Y., Han J., Ma Q., Feng J. Optimal configuration and operation analysis of solar-assisted natural gas distributed energy system with energy storage. *Energy*, 2022, vol. 246, pp. 123429. DOI: 10.1016/j.energy.2022.123429.
- 23. Amiruddin A., Dargaville R. Gawler R. Optimal integration of renewable energy, energy storage, and Indonesia's super grid. *Energies*, 2024, vol. 17, pp. 5061. DOI: 10.3390/en17205061.
- Losev F.A., Sushkov V.V. Polycriterial approach to the analysis of measures to improve the stability of electric motor load units of oil producing enterprises. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 8, pp. 55–64. (In Russ.) DOI: 10.18799/24131830/2019/8/2212.
- 25. Losev F.A., Sushkov V.V., Timoshkin V.V., Martyanov A. S. Increasing the stability of submersible electric motors of electric centrifugal pump installations during voltage drops using adaptive minimum voltage protection. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 10, pp. 40–48. (In Russ.)

#### Information about the authors

**Nikita S. Baturin**, Postgraduate Student, Omsk State Technical University, 11, Mira avenue, Omsk, 644050, Russian Federation. NBaturin13@gmail.com; https://orcid.org/0009-0009-4847-3740

**Ivan M. Bogachkov**, Cand. Sc., Associate Professor, Tyumen Industrial University, 38, Volodarsky street, Tyumen, 625000, Russian Federation. Bogim83@mail.ru; https://orcid.org/0000-0001-7222-4511

**Rustam N. Khamitov**, Dr. Sc., Professor, Tyumen Industrial University, 38, Volodarsky street, Tyumen, 625000, Russian Federation. apple\_27@mail.ru; https://orcid.org/0000-0001-9876-5471

Received: 20.11.2024 Revised: 13.12.2024 Accepted: 23.04.2025 УДК 546.77; 66.091.3 DOI: 10.18799/24131830/2025/5/5059 Шифр специальности ВАК: 2.4.4 Научная статья

# Исследование каталитических свойств порошков системы «молибден–бор», синтезированных безвакуумным дуговым методом

## Ю.З. Васильева<sup>⊠</sup>, Ю.А. Некля

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск

<sup>⊠</sup>yzv1@tpu.ru

Аннотация. Актуальность исследования связана с поиском альтернативных путей получения энергии, в том числе с использованием водорода в качестве источника энергии. Для эффективного получения водорода электролизом требуются катализаторы. Материалы на основе молибдена, в том числе бориды молибдена, рассматриваются в качестве перспективных аналогов для замены дорогостоящих катализаторов на основе благородных металлов. Кроме того, применение оригинального безвакуумного электродугового метода синтеза позволяет повысить энергоэффективность получения порошков боридов молибдена. Цель: получение порошков в системе «молибден-бор» безвакуумным электродуговым методом и оценка их электрокаталитических свойств в реакции выделения водорода. Объект: порошковые образцы системы «молибден-бор», полученные при варьировании атомного соотношения молибдена к бору от Мо/В=1/1 до 1/15 при фиксированных силе тока 200 А и длительности горения дугового разряда 40 с. Методы: безвакуумный электродуговой синтез; рентгеновская дифрактометрия (рентгенофазовый анализ); растровая электронная микроскопия; спектроскопия комбинационного рассеяния; метод анализа удельной поверхности – БЭТ; вольтамперометрический анализ. Результаты и выводы. Проведен синтез порошков боридов молибдена оригинальным электродуговым методом, основанным на горении дугового разряда в открытом воздухе. Реализовано масштабирование процесса путем увеличения массы обрабатываемого сырья при постоянных энергетических характеристиках. В работе впервые исследованы электрокаталитические свойства порошка, синтезированного безвакуумным методом в системе «молибден-бор» с применением атмосферного дугового разряда постоянного тока. Полученные характеристики сравнимы с аналогами и свидетельствуют о невысокой каталитической активности в реакции выделения водорода. Для дальнейшего улучшения параметров каталитической активности образцов в части снижения величины перенапряжения возможно использование незначительных массовых добавок платины.

Ключевые слова: борид молибдена, синтез, безвакуумный метод, дуговой разряд, катализатор, водород, электролиз

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-79-01145, https://rscf.ru/project/23-79-01145/.

**Для цитирования:** Васильева Ю.З., Некля Ю.А. Исследование каталитических свойств порошков системы «молибден-бор», синтезированных безвакуумным дуговым методом // Известия томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 5. – С. 207–215. DOI: 10.18799/24131830/2025/5/5059

UDC 546.77; 66.091.3 DOI: 10.18799/24131830/2025/5/5059 Scientific paper

# Catalytic properties of molybdenum-boron system powders synthesized by vacuum-free arc method

# Yu.Z. Vassilyeva<sup>⊠</sup>, Yu.A. Neklya

National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

<sup>⊠</sup>yzv1@tpu.ru

**Abstract.** *Relevance.* The search for alternative ways of energy production, including the use of hydrogen as an energy source. The efficient hydrogen production by electrolysis requires catalysts. Molybdenum-based materials, including molybdenum borides, are considered as promising analogs to replace expensive noble metal-based catalysts. In addition, the application of the original vacuum-free electric arc synthesis method allows increasing energy efficiency of molybdenum boride powders production. *Aim.* To obtain powders in molybdenum-boron system by vacuum-free electric arc method and to evaluate their electrocatalytic properties in the hydrogen evolution reaction. *Object.* Powder samples of the molybdenum-boron system obtained by varying the atomic ratio of molybdenum to boron from Mo/B=1/1 to 1/15 at fixed current strength of 200 A and arc discharge burning duration of 40 s. *Methods.* Vacuum-free electric arc synthesis; X-ray diffractometry (X-ray phase analysis); scanning electron microscopy; Raman spectroscopy; specific surface analysis method – BET; voltammetric analysis. *Results.* The authors have carried out the synthesis of molybdenum boride powders by the original electric arc method based on the arc discharge burning in open air. Scaling of the process was realized by increasing the mass of the processed raw material at constant energy characteristics. The authors investigated the electrocatalytic properties of the powder synthesized by a vacuum-free method in the molybdenum-boride system using an atmospheric DC arc discharge. The obtained characteristics are comparable with analogs and indicate a low catalytic activity in the reaction of hydrogen evolution. It is possible to use insignificant mass additions of platinum for further improvement of parameters of catalytic activity of the samples in terms of reducing the value of overvoltage.

Keywords: molybdenum boride, synthesis, vacuum-free method, arc discharge, catalyst, hydrogen, electrolysis

**Acknowledgements:** The study was supported by a grant from the Russian Science Foundation no. 23-79-01145, https://rscf.ru/project/23-79-01145/.

**For citation:** Vassilyeva Yu.Z., Neklya Yu.A. Catalytic properties of molybdenum–boron system powders synthesized by vacuum-free arc method. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic university. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 5, pp. 207–215. DOI: 10.18799/24131830/2025/5/5059

#### Введение

В настоящее время переход от текущей энергетики, основанной на добыче полезных ископаемых, к возобновляемой является масштабной задачей, которая требует решения большого количества научных и экономических вопросов [1]. Одним из основных элементов перехода к альтернативной энергетике является водород, обеспечивая возможность производства чистой энергии, ее эффективного хранения и распределения [2].

Водород является предпочтительным источником возобновляемой энергии благодаря низкому углеродному следу, широкой распространенности и способности преобразования в различные доступные формы энергии [3]. Большое внимание уделяется производству водорода путем электролиза воды [4]. При этом для ускорения реакции и снижения энергоемкости процесса применяют различные катализаторы, преимущественно на основе металлов платиновой группы (платина, палладий, иридий и др.), что обусловлено их низким перенапряжением. Однако высокая стоимость и относительно небольшие запасы препятствуют их широкому применению. В этой связи актуален вопрос перехода на недорогие аналоги катализаторов со схожими свойствами. Перспективными в этой области считаются материалы на основе молибдена – карбиды, фосфиды, силициды, бориды, так как они обладают структурой схожей с платиной [5-9]. Например, авторы работы [10] исследовали каталитические свойства карбида молибдена Мо<sub>2</sub>С в реакции выделения водорода, в результате чего обнаружили высокие показатели каталитической активности. Силицид молибдена также имеет потенциал применения в качестве носителя заряда в реакции выделения водорода из воды в 0,5 M растворе  $H_2SO_4$  [11]. В последних исследованиях была продемонстрирована эффективность материалов, содержащих бор, в улучшении каталитической активности для выделения водорода. Высокой электрокаталитической активностью в реакции выделения водорода обладают некоторые фазы борида молибдена (β-MoB, MoB<sub>2</sub>), что говорит о возможном применении данного материала в качестве эффективного катализатора [12]. Таким образом, применение материалов на основе молибдена в качестве носителя катализатора является перспективным, поскольку снижает энергию активации реакции и стоимость в силу замены дорогостоящих металлов платиновой группы [13].

Существует множество методов получения борида молибдена: лазерная абляция, электрохимический синтез в расплавленных солях, спекание в инертной атмосфере, термический синтез при пониженной температуре, твердофазный синтез, термобарический синтез, химическое и физическое осаждение из газовой фазы [14-20], однако большинство из них реализуются с использованием инертной среды, а также с применением вакуума. Кроме того, данные методы имеют ряд недостатков в силу многостадийности процесса получения борида молибдена. Одним из перспективных методов синтеза борида молибдена и материалов на его основе является электродуговой метод [21]. Разновидностью последнего считается безвакуумный электродуговой метод, реализуемый в среде атмосферного воздуха. В результате такого подхода возможен отказ от вакуумного оборудования, что приводит к повышению энергоэффективности и уменьшению массогабаритных параметров установки [22]. Ранее авторами была продемонстрирована принципиальная возможность получения боридов молибдена при воздействии атмосферного дугового разряда переменного тока [23].

В данной работе представлены экспериментальные исследования по получению порошков в системе «молибден-бор» под действием атмосферного дугового разряда постоянного тока при изменении массы шихты с фиксированными энергетическими параметрами. Кроме того, в работе впервые проведено исследование электрокаталитических свойств материалов на основе боридов молибдена в реакции выделения водорода.

#### Материалы и методы

В качестве исходного сырья использовали наноразмерный порошок молибдена (ООО «Передовые порошковые технологии», Россия) и порошок рентгеноаморфного бора («Редкий металл», Россия), которые предварительно смешивались в различных атомных соотношениях (Мо/В=1/1, 1/2, 1/5, 1/15) в шаровой мельнице Retsch PM100 в течение 15 мин при частоте 400 об/мин.

Экспериментальные исследования проводились на электродуговом реакторе постоянного тока [24]. Исходную смесь в количестве 1,0 г помещали в полый графитовый катод в форме малого тигля (внешний диаметр 20 мм, высота 20 мм). Затем малый тигель накрывали графитовой крышкой и помещали в тигель большего размера (внешний диаметр 40 мм, высота 40 мм). В качестве анода использовали графитовый цилиндрический стержень (диаметр 8 мм, длина 100 мм). Дуговой разряд инициировали в полости большего тигля между концом анода и крышкой малого тигля. Были проведены серии экспериментов по получению кристаллических фаз в системе «молибден-бор» с увеличением массы исходной смеси в несколько раз (от 0,5 до 3-4,8 г в зависимости от соотношения молибдена к бору) при фиксированных параметрах дугового реактора: сила тока 200 А, длительность воздействия дугового разряда 40 с.

Рентгенофазовый анализ полученных образцов проводился на рентгеновском дифрактометре Shimadzu XRD-7000S (Shimadzu, Япония) с использованием СиКа излучения ( $\lambda$ =1,54060 Å) в диапазоне углов 10–90°, шаг сканирования составлял 0,03°. Морфологию синтезированных образцов анализировали методом растровой электронной микроскопии (PЭМ) с использованием микроскопа марки TESCAN VEGA 3 SBU с энергодисперсионной приставкой Oxford Instruments X-Max 50 (TESCAN, Чехия) в режиме низкого вакуума при ускоряющем напряжении 20 кВ. Спектроскопию комбинационного рассеяния (КР) синтезированных образцов проводили с помощью спектрометра Confotec Uno (SOL Instruments Company, Германия) с применением в качестве источника возбуждения DPSS-лазера зеленого света λ=532 нм мощностью >50 мВт и оптического микроскопа (CX40M Metallurgical Microscope) с объективом 40X/0,75×NA. Измерения проводились при комнатной температуре. Текстурные характеристики, а именно удельную площадь поверхности образцов, определяли методом БЭТ на анализаторе Sync 420A (Microtrac, Россия). Для оценки каталитической активности синтезированных образцов борида молибдена в реакции выделения водорода (hydrogen evolution reaction – HER) проводились исследования электрохимических параметров путем снятия линейной вольтамперометрии. Испытания проводились в электролитической трехэлектродной ячейке с использованием рабочей станции марки CHI 604E в кислотном растворе (0,5 М H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>). В качестве электродов использовали насыщенный каломельный электрод (электрод сравнения), платиновую нить (противоэлектрод), цилиндрический стеклоуглеродный электрод L-типа (рабочий электрод).

#### Результаты и обсуждение

В работе были проведены несколько серий экспериментов, направленных на масштабирование процесса безвакуумного электродугового получения боридов молибдена за счет увеличения массы шихты. В процессе экспериментов регистрировался состав газовой среды в реакционной зоне. Согласно полученным данным (рис. 1), в результате взаимодействия эродированного углерода с кислородом воздуха образуется газовая среда, состоящая из монооксида и диоксида углерода, максимальная концентрация которых в среднем составляет ~ 9,5 и ~ 11,3 %, соответственно. Следовательно, наблюдается эффект самоэкранирования реакционной зоны при безвакуумном синтезе порошков в системе «молибден–бор».

В первой серии экспериментов изменяли количество обрабатываемого сырья от 0,5 до 2,0 г с шагом в ~0,5 г при соотношении Мо/В=1/5. Полученные картины рентгеновской дифракции представлены на рис. 2. Как можно заметить, при увеличении массы шихты от 0,5 до 2,0 г фазовый состав существенно не меняется: главные максимумы, расположенные на 20~25,47°, 34,57°, 46,09°, принадлежат фазе пентаборида димолибдена (Мо<sub>2</sub>В<sub>5</sub>, ICDD № 03-065-4029). Однако стоит отметить небольшое увеличение интенсивности дифракционных максимумов, соотносящихся с эталонными для фазы диборида молибдена (MoB<sub>2</sub>, ICDD № 00-069-0392), а также появление малоинтенсивного максимума фазы высшего борида молибдена (MoB<sub>5-x</sub>), расположенного на 20~24,19°.



**Рис. 1.** Зарегистрированные данные состава образующейся газовой атмосферы в реакционной зоне: O<sub>2</sub> (a), CO и CO<sub>2</sub> (6) **Fig. 1.** Data on the recorded composition of the formed gas atmosphere in the reaction zone: O<sub>2</sub> (a), CO and CO<sub>2</sub> (6)



**Рис. 2.** Картины рентгеновской дифракции образцов, синтезированных при атомном соотношении Mo/B=1/5 при варьировании массы шихты

**Fig. 2.** X-ray diffraction patterns of samples synthesized at atomic ratio Mo/B=1/5 at varying mixture weight

Далее для атомных соотношений Мо/В=1/1, 1/2 и 1/15 были проведены эксперименты с минимальной (0,5 г) и максимальной загрузкой шихты, которая с учетом насыпной плотности исходных компонентов составила 4,76, 3,91 и 1,85 г, соответственно. Согласно РФА, состав образцов Мо/В=1/1 (рис. 3, а) представлен кристаллическими фазами Mo (ICDD № 01-077-8340), Mo<sub>2</sub>B (ICDD № 04-001-0962), α-MoB (ICDD № 00-051-0940) и β-MoB (ICDD № 04-004-7182); Мо/В=1/2 (рис. 3, б) – а-МоВ, β-МоВ и МоВ<sub>2</sub>; Мо/В=1/15 (рис. 3, в) – МоВ<sub>2</sub>, Мо<sub>2</sub>В<sub>5</sub> и МоВ<sub>5-х</sub>. При этом с увеличением массы шихты соотношение относительных интенсивностей дифракционных максимумов сохраняется, что свидетельствует об идентичности фазового состава. Таким образом, можно утверждать, что за один рабочий цикл безвакуумного дугового реактора постоянного тока длительностью 40 с при силе тока источника питания 200 А можно обработать от 0,5 до ~ 4,8 г (в зависимости от соотношения исходных компонентов) при количестве энергии ~120 кДж.

Анализ морфологии частиц полученных образцов выполнен методом растровой электронной микроскопии. Снимки, полученные в режиме обратно рассеянных электронов, представлены на рис. 3, *г*. Как можно заметить, образованные частицы преимущественно имеют округлую форму, присутствуют как отдельные, так и агломерированные частицы. Во всех образцах наблюдается широкое распределение частиц по размерам (от единиц до сотен нм), что характерно для группы электродуговых методов синтеза. Максимум распределения частиц во всех образцах находится в диапазоне 5–20 мкм (рис. 3, *г*). При этом в образце Mo/B=1/2 распределение частиц по размерам более равномерное относительно других образцов.

Спектроскопия КР позволяет провести химический и структурный анализ полученного продукта. На рис. 4, а показаны зарегистрированные КР-спектры образцов, полученных при различном соотношении молибдена к бору, в которых прослеживается наличие четких пиков, что указывает на высокую степень кристалличности полученных продуктов. Как можно заметить, все спектры соотносятся между собой и содержат одинаковый набор пиков. Согласно [19], пики около  $\sim 270, 320$  и 350 см<sup>-1</sup> могут быть отнесены к модам колебаний (E1g, A1g и E12g симметрии) для колебаний атомов бора в соединении МоВ. Тогда как пик, расположенный на ~982 см<sup>-1</sup>, может быть отнесен к модам колебаний связей В-В в соединении МоВ. Стоит отметить, что с увеличением атомной доли бора от 1 до 15 пики, расположенные на ~322, 809 и ~982 см<sup>-1</sup>, смещаются влево, в сторону меньшего сдвига (~316, ~795 и ~966 см<sup>-1</sup>, соответственно).



**Рис. 3.** Картины рентгеновской дифракции образцов, синтезированных при атомном соотношении: а) Мо/В=1/1; б) Мо/В=1/2; в) Мо/В=1/15; г) снимки растровой электронной микроскопии образцов со вставкой распределения частиц по размерам





Puc. 4. Спектры комбинационного рассеяния (a) и изотермы адсорбции-десорбции азота (б) для образцов, синтезированных в системе «молибден-бор» при различном соотношении исходных компонентов
 Fig. 4. Raman spectra (a) and nitrogen adsorption-desorption isotherms (б) for samples synthesized in the molybdenum-boron system at different ratios of initial components

Кроме того, в образце Мо/В=1/15 практически не наблюдается пик на 270 см<sup>-1</sup> в отличии от других образцов. Это подтверждает различие фазового состава образцов, синтезированных при разном соотношении молибдена к бору.

Одним из ключевых параметров катализаторов, в том числе для получения водорода путем электролиза, является удельная площадь поверхности. В этой связи для полученных образцов были проведены исследования текстурных характеристик. Полученная площадь поверхности варьируется в интервале от ~0,6 до ~4,0 м<sup>2</sup>/г, что характерно для образцов, синтезированных безвакуумным электродуговым методом. На рис. 4, *б* представлены зарегистрированные изотермы адсорбции и десорбции, форма которых, согласно классификации IUPAC [25], соответствует III типу изотерм. Размер пор варьируется от 7 до 12 нм и указывает на наличие мезопористой структуры.

Для оценки электрокаталитической активности синтезированных образцов борида молибдена, полученных при разном соотношении молибдена к бору в исходной смеси, в реакции выделения водорода были сняты кривые линейной вольтамперометрии, которые представлены на рис. 5, *а*. Сравнение полученных данных с литературными представлено в таблице.

Как известно, стандартному катализатору – 20 % платины, нанесенной на углеродный носитель (Pt(20 %)/C), для достижения плотности тока 10 мA/см<sup>2</sup> требуется перенапряжение  $\eta_{10}$ =43 мB. Как видно из представленных данных, все образцы, синтезированные при электродуговой обработке, в исходном виде характеризуются невысокой каталитической активностью в сравнении с платиной, о которой можно судить по значению  $\eta_{10}$ , которое составляет 337 мB<432 мB<527 мB<652 мB для образцов Мо/B=1/2<Mo/B=1/5<Mo/B=1/15<Mo/B=1/1, соответственно. Невысокую каталитическую активностью, можно связать с недостаточной электропроводностью,

низкой удельной площадью поверхности образцов и широким диапазоном распределения частиц по размерам в синтезированном материале. С помощью уравнения Тафеля, показывающего связь между скоростью химической реакции и перенапряжением, можно описать электрохимическую кинетику процесса на поверхности катализатора. Идеальный катализатор должен иметь наименьшее возможное значение наклона Тафеля, т. е. он дает увеличение тока и, соответственно, количества вырабатываемого водорода при наименьшем изменении напряжения. На рис. 5, б в сравнении показаны графики тафелевского наклона для исследуемых образцов, представляющие зависимость обратного перенапряжения от логарифма силы тока. Зависимость наклона Тафеля для синтезированных образцов следующая: Мо/В=1/5<Мо/В=1/2<Мо/В=1/15<Мо/В=1/1, а именно 112 мВ/дек<130 мВ/дек<139 мВ/дек<248 мВ/дек. Значение наклона Тафеля для стандартного электрода на основе Pt(20 %)/С составляет около 30 мВ/дек [26]. Полученные экспериментальные данные соотносятся с аналогичными показателями других материалов на основе боридов молибдена, описанных в литературе (таблица).

Таким образом, в идентичных экспериментальных условиях образец, синтезированный безвакуумным электродуговым методом из смеси молибдена к бору 1/2, демонстрирует более высокую каталитическую активность среди исследованных образцов. Это может быть обусловлено особенностями фазового состава, морфологического строения, связанными с наличием наноразмерных частиц в составе порошка, а также более равномерным распределением частиц по размерам. Тем не менее сравнение с известными литературными данными демонстрирует необходимость дальнейшего улучшения параметров каталитической активности в части снижения величины перенапряжения, что потенциально можно реализовать путем незначительных массовых добавок платины на образец.





Fig. 5. Linear voltammetry curves (a) and Tafel slope plot (6) for catalysts based on synthesized molybdenum boride samples

Таблица. Сравнение результатов электрохимической активности образцов борида молибдена в реакции выделения водорода в электролите 0,5 М H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> с данными, представленными в литературе

Table.	Comparison of the results of electrochemical activity of molybdenum boride samples in hydrogen evolution reaction
	in 0.5 M H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> electrolyte with the literature data

Катализатор	$\eta_1$	$\eta_{10}$	$\eta_{100}$	Наклон Тафеля, мВ/дек	Литература
Catalyst	мB/mV			Tafel slope, mV/dec	Reference
Mo/B=1/1	-376	-652	-898	248	
Mo/B=1/2	-202	-337	-615	130	эта работа
Mo/B=1/5	-279	-432	-863	112	this work
Mo/B=1/15	-361	-527	-839	139	
коммерческий катализатор Pt/C commercial catalyst Pt/C	-	-43	-	31	[27]
5 %Pt/C	-	-62	-	37	[28]
Мо	-	-633	-	187	[28]
MoB <sub>2</sub>	-	-230	-	100	[12]
MoB <sub>2</sub>	-87	-154	-	49	[28]
α-MoB₂ нанолисты α-MoB₂ nanosheets	-	-141	-	62	[29]
α-MoB <sub>2</sub>	-	-149	-220	74,2	[30]
α-MoB <sub>2</sub>	-	-226	-349	73,3	[31]
β-MoB <sub>2</sub>	-	-277	-411	81,7	[31]
Мо₃В пленки Мо₃В films	-	-230	-	52	[32]
MoB	-	-210	-	55	[33]

#### Выводы

- Проведены исследования по получению порошков в системе «молибден-бор» безвакуумным электродуговым методом. Установлено, что при варьировании соотношения исходных компонентов – молибдена и бора, заявленным методом можно синтезировать следующие кристаллические фазы боридов молибдена: Mo<sub>2</sub>B, α-MoB, β-MoB, MoB<sub>2</sub>, Mo<sub>2</sub>B<sub>5</sub> и MoB<sub>5-х</sub>.
- Реализация масштабирования процесса синтеза боридов молибдена на безвакуумном дуговом реакторе возможна путем увеличения массы шихты в 3–4 раза при неизменных конструктивных и энергетических параметрах. В результате

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

силе тока источника питания 200 А можно обработать от 0,5 до ~4,8 г (в зависимости от соотношения исходных компонентов) при количестве энергии ~120 кДж.
3. Проведена оценка каталитической активности

за один рабочий цикл длительностью 40 с при

- 5. Проведена оценка каталитической активности образцов боридов молибдена, синтезированных безвакуумным электродуговым методом, в реакции выделения водорода. Установлено, что наибольшая активность соответствует образцу Mo/B=1/2, который характеризуется величиной перенапряжения –337 мВ при плотности тока 10 мА/см<sup>2</sup>.
- 1. Dincer I., Acar C. Smart energy solutions with hydrogen options. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2018, vol. 43, pp. 8579–8599.
- 2. Kovač A., Paranos M., Marciuš D. Hydrogen in energy transition: a review. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2021, vol. 46, pp. 10016–10035.
- 3. Karimi M., Wang X., Hamilton J., Negnevitsky M. Numerical investigation on hydrogen-diesel dual-fuel engine improvements by oxygen enrichment. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2022, vol. 47, pp. 25418–25432.
- 4. Tüysüz H. Alkaline water electrolysis for green hydrogen production. *Accounts of Chemical Research Journal*, 2024, vol. 57, pp. 558–567.
- 5. Xiao P., Sk M.A., Thia L., Ge X., Lim R.J., Wang J.-Y., Lim K.H., Wang X. Molybdenum phosphide as an efficient electrocatalyst for the hydrogen evolution reaction. *Energy & Environmental Science*, 2014, vol. 7, pp. 2624–2629.
- 6. Zhang X., Yu X., Zhang L., Zhou F., Liang Y., Wang R. Molybdenum phosphide/carbon nanotube hybrids as pH-universal electrocatalysts for hydrogen evolution reaction. *Advanced Functional Materials*, 2018, vol. 28, pp. 1706523.
- Chufarov M., Vassilyeva Y.Z., Zhang X., Li S., Pak A.Y., Han W. Design of a long-lived Mo<sub>2</sub>C-MoO<sub>2</sub>@GC-N electrocatalyst by the ambient DC arc plasma for the hydrogen evolution reaction. *IScience*, 2024, vol. 27, no. 9, no. 110551.
- Scanlon M.D., Bian X., Vrubel H., Amstutz V., Schenk K., Hu X., Liu B., Girault H.H. Low-cost industrially available molybdenum boride and carbide as "platinum-like" catalysts for the hydrogen evolution reaction in biphasic liquid systems. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 2013, vol. 15, pp. 2847–2857.
- 9. Wang F., Li W., Pan H., Zhang Z., Kong C., Min S. Intermetallic molybdenum disilicide: a new, active, and stable cocatalyst for efficient solar hydrogen production. *Sustainable Energy Fuels*, 2023, vol. 7, pp. 629–635.
- 10. Wan C., Regmi Y.N., Leonard B.M. Multiple phases of molybdenum carbide as electrocatalysts for the hydrogen evolution reaction. *Angewandte Chemie International Edition*, 2014, vol. 53, pp. 6407–6410.

- Su Y., Xie Y., Qin H., Huang Z., Yin Q., Li Z., Zhang R., Zhao Z., Wu F., Ou G. Ultrafine molybdenum silicide nanoparticles as efficient hydrogen evolution electrocatalyst in acidic medium. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2022, vol. 47, pp. 28924–28931.
- 12. Park H., Encinas A., Scheifers J.P., Zhang Y., Fokwa B.P.T. Boron-dependency of molybdenum boride electrocatalysts for the hydrogen evolution reaction. *Angewandte Chemie International Edition*, 2017, vol. 56, pp. 5575–5578.
- 13. Dutta S., Han H., Je M., Choi H., Kwon J., Park K., Indra A., Kim K.M., Paik U., Song T. Chemical and structural engineering of transition metal boride towards excellent and sustainable hydrogen evolution reaction. *Nano Energy*, 2020, vol. 67, no. 104245.
- 14. Rout C.S., Shinde P.V, Patra A., Jeong S.M. Recent developments and future perspectives of molybdenum borides and MBenes. *Advanced Science*, 2024, vol. 11, no. 2308178.
- 15. Li Y., Fan Y., Chen Y. A novel route to nanosized molybdenum boride and carbide and/or metallic molybdenum by thermosynthesis method from MoO<sub>3</sub>, KBH<sub>4</sub>, and CCl<sub>4</sub>. *Journal of Solid State Chemistry*, 2003, vol. 170, pp. 135–141.
- 16. Wang Y., Zhang H., Jiao S., Chou K.C., Zhang G.H. A facile pathway to prepare molybdenum boride powder from molybdenum and boron carbide. *Journal of the American Ceramic Society*, 2020, vol. 103, pp. 2399–2406.
- Kuznetsov S.A., Kuznetsova S.V., Rebrov E.V, Mies M.J.M., De Croon M., Schouten J.C. Synthesis of molybdenum borides and molybdenum silicides in molten salts and their oxidation behavior in an air-water mixture. *Surface and Coatings Technology*, 2005, vol. 195, pp. 182–188.
- Peng G., Zhao J.-W., Wang J., Hoenig E., Wu S., Wang M., He M., Zhang L., Liu J.-X., Liu C. Crystal structures of molybdenum borides dictate electrocatalytic ammonia synthesis efficiency. *Applied Catalysis B: Environment and Energy*, 2023, vol. 338, no. 123020.
- 19. Vinoth S., Das H.T., Govindasamy M., Wang S.-F., Alkadhi N.S., Ouladsmane M. Facile solid-state synthesis of layered molybdenum boride-based electrode for efficient electrochemical aqueous asymmetric supercapacitor. *Journal of Alloys and Compounds*, 2021, vol. 877, no. 160192.
- 20. Kornev R.A., Sennikov P.G., Gornushkin I.B., Ermakov A.A., Shkrunin V.E., Polykov V.S., Kornev A.R., Kornev K.D. Laser induced dielectric breakdown as a novel method for the synthesis of molybdenum boride. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 2022, vol. 42, pp. 395–412.
- 21. Katrych S., Grytsiv A., Bondar A., Rogl P., Velikanova T., Bohn M. Structural materials: metal-silicon-boron: on the melting behavior of Mo-Si-B alloys. *Journal of Alloys and Compounds*, 2002, vol. 347, no. 1–2, pp. 94–100.
- 22. Vassilyeva Y.Z., Larionov K.B., Afonnikova S.D., Povalyaev P.V., Komkina U.S., Neklya Y.A., Mishakov I.V., Pak A.Y. Synthesis of Mo<sub>2</sub>C-based material in DC arc discharge plasma under ambient air conditions. *Materials Chemistry and Physics*, 2024, vol. 314, no. 128805.
- 23. Vassilyeva Y.Z., Pak A.Y., Speranskiy M.Y., Lavrenchuk A.A., Neklya Y.A. Synthesis of micro-sized powders of molybdenum borides by atmospheric AC arc discharge. *Pisma v Zhurnal Tekhnicheskoi Fiziki*, 2024, vol. 50, no. 12, pp. 16–19.
- 24. Vassilyeva Y.Z., Pak A.Y., Kokorina A.I., Bolatova Z.S., Glushkov D.O. Electric arc vacuumless synthesis of IV–V group transition metal carbides. *Transition Metal Chemistry*, 2024, vol. 49, no. 6, pp. 485–493.
- Sing K.S.W., Everett D.H., Haul R.A.W., Moscou L., Pierotti R.A., Rouquerol J., Siemieniewska T. Reporting physisorption data for gas/solid systems with special reference to the determination of surface area and porosity. *Pure and Applied Chemistry*, 1985, vol. 57, pp. 603–619.
- 26. Wang J., Xia H., Peng Z., Lv C., Jin L., Zhao Y., Huang Z., Zhang C. Graphene porous foam loaded with molybdenum carbide nanoparticulate electrocatalyst for effective hydrogen generation. *ChemSusChem*, 2016, vol. 9, pp. 855–862.
- 27. Ma S., Yang H., Chen X., Hu G., Chen W.T., Bradley S.J., Zhang W., Verma G., Nann T., Jiang D.E., Kruger P.E., Wang X., Tian H., Waterhouse G.I.N., Telfer S.G. Highly efficient electrocatalytic hydrogen evolution promoted by O-Mo-C interfaces of ultrafine β-Mo<sub>2</sub>C nanostructures. *Chemical Science*, 2020, vol. 11, pp. 3523–3530.
- 28. Jothi P.R., Zhang Y., Scheifers J.P., Park H., Fokwa B.P.T. Molybdenum diboride nanoparticles as a highly efficient electrocatalyst for the hydrogen evolution reaction. *Sustainable Energy Fuels*, 2017, vol. 1, pp. 1928–1934.
- 29. Liu X., Gong Y. α-MoB<sub>2</sub> nanosheets for hydrogen evolution in alkaline and acidic media. *ACS Applied Nano Materials Journal*, 2022, vol. 5, pp. 10183–10191.
- 30. Chen Y., Yu G., Chen W., Liu Y., Li G.-D., Zhu P., Tao Q., Li Q., Liu J., Shen X. Highly active, nonprecious electrocatalyst comprising borophene subunits for the hydrogen evolution reaction. *Journal of the American Chemical Society*, 2017, vol. 139, pp. 12370–12373.
- 31. Park H., Zhang Y., Lee E., Shankhari P., Fokwa B.P.T. High-current-density HER electrocatalysts: graphene-like boron layer and tungsten as key ingredients in metal diborides. *ChemSusChem*, 2019, vol. 12, pp. 3726–3731.
- 32. Wang X., Tai G., Wu Z., Hu T., Wang R. Ultrathin molybdenum boride films for highly efficient catalysis of the hydrogen evolution reaction. *Journal of Materials Chemistry A*, 2017, vol. 5, pp. 23471–23475.
- 33. Vrubel H., Hu X. Molybdenum boride and carbide catalyze hydrogen evolution in both acidic and basic solutions. *Angewandte Chemie International Edition*, 2012, vol. 51, pp. 12703–12706.

#### Информация об авторах

Юлия Захаровна Васильева, кандидат технических наук, научный сотрудник лаборатории перспективных материалов энергетической отрасли Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. yzv1@tpu.ru; http://orcid.org/0000-0002-6196-639X

Юлия Александровна Некля, студент, старший лаборант организационного отдела Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. yan26@tpu.ru; http://orcid.org/0009-0007-5824-0399.

Поступила в редакцию: 19.03.2025 Поступила после рецензирования: 24.03.2025 Принята к публикации: 10.04.2025

#### Information about the authors

Yuliya Z. Vassilyeva, Cand. Sc., Researcher, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. yzv1@tpu.ru; http://orcid.org/0000-0002-6196-639X
Yulia A. Neklya, Student, Senior Laboratory Assistant, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. yan26@tpu.ru; http://orcid.org/0009-0007-5824-0399

Received: 19.03.2025 Revised: 24.03.2025 Accepted: 10.04.2025 УДК 622.276 DOI: 10.18799/24131830/2025/5/5048 Шифр специальности ВАК: 1.6.11 Обзорная статья

# Процессы развития технологии нефтегазовой отрасли с использованием искусственного интеллекта

# А.В. Карсаков1<sup>™</sup>, П.Н. Зятиков<sup>2</sup>, И.В. Шарф<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск <sup>2</sup> Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия, г. Томск

#### <sup>⊠</sup>Avk163@tpu.ru

Аннотация. Актуальность исследования обусловлена стратегической задачей развития нефтегазовой отрасли Российской Федерации по цифровой трансформации и интеллектуализации, что позволит сохранить конкурентоспособность отечественных компаний с учетом происходящих макроэкономических и макроэнергетических процессов. Вместе с тем в нормативном, научном и отраслевом поле отсутствует единый терминологический подход к данным понятиям, что и определило цель настоящей работы, которая заключается в развитии научных основ цифровизации и интеллектуализации нефтегазовой отрасли с учетом содержательного и иерархического взгляда на понятийный аппарат. Целью настоящего исследования является развитие научных основ цифровизации и интеллектуализации нефтегазовой отрасли с учетом содержательного и иерархического взгляда на понятийный аппарат, используемый в научном и отраслевом поле. Показаны наиболее перспективные и развиваемые технологии, привлекающие пристальное внимание со стороны недропользователей, из чего следует, что в части поиска и разработки месторождений имеется значимый потенциал роста применения интеллектуальных технологий. Методы и информационная база исследования. Использованы материалы научных работ, нормативно-правовая база различной юридической силы. Основными методами исследования стали эмпирический, аналитический, экономикостатистический. Результаты. Авторами структурированы эффекты от реализации цифровой трансформации и интеллектуализации в нефтегазовом промысле. Предложены авторские дефиниции, обозначено видение содержательных изменений в поступательном движении от обычного промысла к интеллектуальному, включающее в себя дистанционное управление, сбор и обработку данных контрольно-измерительных приборов и систем наблюдения с прохождением алгоритмов верификации, многовариантный прогноз и автоматическое принятие наиболее эффективных решений. Представлено авторское видение встраивания инструментов цифровой трансформации и интеллектуализации в разноуровневое управление интеллектуальным промыслом посредством цифрового куратора и цифрового помощника. Предложена блочная структура интеллектуализации, включающая в себя цифровой промысел, цифровое предприятие и цифровое проектирование, в которой развитие каждого элемента влияет на другие блоки, что в конечном итоге трансформирует всю бизнес-модель. Областью применения работы являются направления разведки и добычи нефти и газа, обустройства месторождений, работ в части процесса проектирования разработки и поверхностной инфраструктуры, а также системный инжиниринг добывающего предприятия.

**Ключевые слова:** месторождение, цифровизация, интеллектуализация, разработка месторождений, цифровой двойник, цифровое предприятие, база данных, системный инжиниринг, автоматизация, проектная документация

**Для цитирования:** Карсаков А.В., Зятиков П.Н., Шарф И.В. Процессы развития технологии нефтегазовой отрасли с использованием искусственного интеллекта // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 5. – С. 216–228. DOI: 10.18799/24131830/2025/5/5048
UDC 622.276 DOI: 10.18799/24131830/2025/5/5048 Review article

# Development of oil and gas industry technologies using artificial intelligence

# A.V. Karsakov<sup>1⊠</sup>, P.N. Zyatikov<sup>2</sup>, I.V. Sharf<sup>1</sup>

<sup>1</sup> National research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation <sup>2</sup> National Research Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation

<sup>⊠</sup>Avk163@tpu.ru

Abstract. Relevance. The strategic problem of oil-and-gas industry development in the Russian Federation in terms of transformation and intelligence that would allow maintaining compatibility of domestic companies taking into account current macroeconomic and macroenergetic processes. In addition, there are no appropriate terms for these issues in legislative, research, and industrial spheres, which defines the purpose of the research. It consists in development of research bases of digitalization and intellectualization for oil-and-gas industry using content and hierarchical approach towards conceptual framework. Aim. To develop scientific foundation for digitalization and intellectualization of oil-and-gas industry in terms of content and hierarchical views on conceptual system used in research and industrial sphere. The paper demonstrates the most perspective and developing technologies attracting close attention of subsoil users. This means that there is a significant growth potential of applying artificial intelligence technologies for prospecting and development of oil deposits. Research methods and information base. Research works, legal framework of different legal forces. Empirical, analytical, and economic-statistical methods. *Results.* The authors have structured the stated effects of digital transformation and intellectualization implementation in digital industry. The authors suggested the definitions, established the view of content transformations in translation motion from traditional industry towards intellectual one including remote control, data gathering and processing from check-reading instrument and observation systems using verification algorithms, multiple-path forecast and automatic decision logic. The authors presented their view of integrating digital transformation and intellectualization tools into multi-level management of intellectual industry by means of digital curator or digital assistant. They suggested the blockoriented intellectualization structure including digital industry, digital enterprise and digital design. In this structure development of each element influences the other blocks that, in the long run, transforms the whole business model. The spheres of practical application of the research are industry of oil-and-gas prospecting and development, field infrastructure development, operations in engineering and surface infrastructure design as well as system engineering of production industry.

**Keywords:** field, digitalization, artificial intelligence, reservoir development, digital twin, digital enterprise, database, systems engineering, automatization, project documentation

**For citation:** Karsakov A.V., Zyatikov P.N., Sharf I.V. Development of oil and gas industry technologies using artificial intelligence. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 5, pp. 216–228. DOI: 10.18799/24131830/2025/5/5048

#### Введение

Современное развитие сегментов геологоразведочных работ (ГРР), добычи, систем сбора и подготовки углеводородов (УВ) нефтегазовой отрасли сопровождается комплексом разноплановых вызовов и угроз, таких как:

- а) санкционное давление, целью которого является запрет на поставку высокотехнологичного оборудования для разработки месторождений УВ, прежде всего с трудноизвлекаемыми запасами (ТрИЗ), снижение возможностей использования зарубежных источников финансирования, препятствия в поставочной логистике УВ потребителям из разных стран [1];
- б) рост доли ТрИЗ, которые по оценке Минприроды к 2030 г. составят в части нефти ≥80 % [2],

что обусловлено как геолого-промысловыми характеристиками продуктивных пластов месторождений (обводненность, проницаемость, термобарические условия и др.), физикохимическими свойствами нефти, так и труднодоступностью месторождений УВ в географоклиматическом плане, что в свою очередь не позволяет наращивать объемы добычи и влечет рост себестоимости нефти, увеличившейся в 2023 г. в 2,7 раза по сравнению с 2012 г. [3];

в) ценовые параметры рынка УВ, которые, несмотря на сопоставимый с первым десятилетием XXI в. уровень цен на нефть, повлекли снижение маржи от добычи УВ почти в два раза вследствие роста капитальных и операционных затрат в отрасли [2].

Ключевым направлением преодоления вышеуказанных вызовов, согласно Энергетической стратегии России на период до 2035 г. (далее Стратегия), Указу Президента РФ [4], является цифровая трансформация и интеллектуализация отраслей ТЭК, в результате которых новое качество приобретут все процессы в сфере энергетики [5], что позволит укрепить и сохранить позиции РФ на мировом рынке энергоносителей, а также будет содействовать социально-экономическому развитию Практическим результатом страны. цифровой трансформации и интеллектуализации в среднесрочной перспективе в разведке, разработке и обустройстве месторождений должен стать интеллектуальный промысел, что является базовым фактором ускоренного перехода (модернизационного рывка) к более эффективной, гибкой и устойчивой добывающей деятельности вертикальноинтегрированных нефтегазовых компаний (ВИНК), формированию адекватных ответов на вызовы и угрозы рынка УВ и решению проблемных задач в разработке месторождений.

Таким образом, целью настоящего исследования является развитие научных основ цифровизации и интеллектуализации нефтегазовой отрасли с учетом содержательного и иерархического взгляда на понятийный аппарат, используемый в научном и отраслевом поле.

#### Методы и информационная база исследования

В исследовании использованы материалы научных работ, нормативно-правовая база различной юридической силы. Основными методами исследования стали эмпирический, аналитический, экономико-статистический.

#### Результаты исследования Цифровая трансформация: дефиниция и эффекты

Проведенное исследование показало, что в настоящее время ни в законодательных актах федерального уровня, ни в отраслевых программных документах, ни в научном поле не представлены единые определения терминов цифровой трансформации и интеллектуализации, но они рассматриваются с нескольких позиций. Так, цифровая трансформация рассматривается в следующих аспектах.

- Достижение стратегических ориентиров. В Указе Президента РФ «О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года и на перспективу до 2036 года» ставится задача технологического лидерства в части цифровой трансформации экономики, что предполагает достижение следующих целевых ориентиров к 2030 г.:
  - а) использование не менее 80 % базового и прикладного российского программного

обеспечения в системах, обеспечивающих основные производственные и управленческие процессы;

- б) 95 %-е использование российского программного обеспечения в государственных корпорациях и компаниях, а также в хозяйственных обществах, в уставном капитале которых доля участия РФ ≥50 %, а также в их аффилированных юридических лицах [4].
- 2. Получение эффектов, таких как:
  - а) технологические эффекты, носящие системный и локальный характер и позволяющие оптимизировать процессы, повышать производительность и рентабельность производства; в частности, снизить себестоимость добычи нефти на ~15 %, сократить внеплановые простои оборудования на 15–20 %, увеличить добычу на 10 % и эффективность использования оборудования на 20–30 %, а также расширить ресурсную базу более чем в три раза [5];
  - б) экологические эффекты, получаемые за счет снижения негативного воздействия на окружающую среду, что особенно актуально в свете Указа Президента РФ о снижении выбросов парниковых газов к 2030 г. до 70 % от уровня 1990 г. [6];
  - в) бюджетные эффекты, в частности объем ожидаемых дополнительные доходов государственного бюджета и компаний оценивается в 2,5–3 трлн р. за 15 лет (за период с 2025 по 2040 гг.) ожидаемые [7];
  - г) социальные эффекты, обусловливающие, с одной стороны, повышение производительности труда и сокращение работников для выполнения определённых функциональных обязанностей, что позволяет перенаправить часть персонала на другие участки производства, с другой стороны, повышение безопасности труда и снижение производственного травматизма [8]; в частности, при онлайнмониторинге строительства скважины возможна экономия в размере 5 млн р./год [9];
  - д) мультипликативные эффекты, которые обусловлены задействованием других отраслей национальной экономики для обеспечения инфрастуктурных и IT-потребностей.
- Получение конкретных цифровых продуктов, в том числе цифрового керна и цифрового двойника [5].

Цифровой керн является результатом моделирования керна посредством цифровых технологий (ЦТ), благодаря чему формируется упорядоченная база цифровых образов кернов и флюидов, используемая в дальнейшем для решения многих задач при разведке и добыче ТрИЗ. Данное направление в России только развивается, но является востребованным, так как позволяет проводить опыты с целью разработки методов повышения нефте- и газоотдачи на основе реалистичной трехмерной модели, созданной посредством мультимасштабной объемной микроскопии, что особенно актуально в случае хрупкости пород, низкой проницаемости (например, породы баженовской свиты) и количественного ограничения кернового материала.

Создание цифровых двойников месторождения (ЦДМ) входит в топ-5 востребованных трендов в нефтегазовой отрасли. ЦДМ является виртуальным отображением происходящих процессов в режиме реального времени, что позволяет оперативно реагировать и корректировать работу добывающих скважин, оборудования и персонала [10]. Необходимо отличать ЦДМ от цифрового двойника актива (ЦДА). ЦДМ есть отражение системы «пласт – скважина - сеть сбора», т. е. технологическая модель, так как работа ЦДМ направлена на решение вопросов, связанных с добычей УВ. ЦДМ является составной частью ЦДА, так как появляются дополнительные звенья, такие как энергетика, кадровый состав и другие участки основного и вспомогательного производства. ЦДА является бизнес-моделью, так как основные целевые ориентиры определяются экономическими критериями, в частности такими, как объемы получаемой прибыли, показатели экономической эффективности геолого-технических мероприятий (ГТМ) и других инвестиционных проектов в разработке месторождений.

 Формирование комплекса используемых цифровых технологий.

Согласно Указу Президента РФ, одной из национальных целей является цифровая трансформация [4]. Цифровая трансформация в перечисленных выше документах, в том числе в утратившей силу с 1.01.2025 г. программе «Цифровая экономика Российской Федерации», и в других НПА не имеет конкретного определения, однако рассматривается с позиции внедрения цифровых технологий (ЦТ).

В соответствии с парадигмой «Индустрия 4.0», являющейся основной темой обсуждения на Всемирном экономическом форуме в Давосе, в научной литературе и в производственном секторе выделяется целый спектр цифровых технологий, ключевыми из которых являются блокчейн, искусственный интеллект, большие данные, интернет вещей, роботы, 3D-печать, расширенная реальность, облачные технологии [11]. Однако имеет место быть отраслевая специфика. Так, согласно [12], из всех ЦТ лидирующие позиции занимает промышленный интернет вещей – 22 % (рис. 1).

Данные направления являются ключевым стратегическим приоритетом нефтегазовых компаний, обусловливающим рост прибыли. В частности, согласно исследованию McKinsey, внедрение ЦТ индустрии 4.0 позволило нарастить выручку в среднем на 122 % [13].

При разработке месторождений УВ применение предиктивной аналитики позволяет предотвратить незапланированные простои вследствие аварий, а также сократить затраты на ремонт на 20-25 %, времени простоя оборудования во время плановопредупредительного (ППР) и капитального ремонта (КР) – на 30-40 %, численности штата ремонтных бригад – на 15-20 %. 3D-печать для создания инструментов и деталей минимизирует простои оборудования на 10-15 %. Аналитика больших данных позволяет оптимизировать производственные процессы и снизить на 20-30 % затраты благодаря анализу информации о состоянии оборудования, логистике и рыночных трендах [14].



Рис. 1. Цифровые тренды Индустрии 4.0 в нефтегазовой отрасли в мире в 2024 г.

Обучение работников на основе дополненной или виртуальной реальности позволяет повысить производительность труда и снизить риски производственного травматизма. В данном примере под искусственным интеллектом понимают алгоритмы вычислений, основанные на нейронных сетях и машинном обучении.

Промышленный интернет вещей (ПИВ) – наиболее активно развивающееся направление в нефтегазовых компаниях – представляет собой скоординированную сеть из физических устройств, датчиков с встроенными IT-инструментами для автоматического сбора и передачи данных с технологического оборудования с целью последующего анализа данных посредством различных программных продуктов и формирования рекомендаций, в т. ч. с помощью методов машинного обучения.

Архитектура ПИВ состоит из трех уровней. Первый уровень является краевым и предполагает встраивание в систему системы интеллектуальных датчиков на различные виды оборудования, задача которых - улавливание изменения различных параметров и последующее их преобразование в цифровой вид. В частности, только на одной скважине может быть до 25 датчиков, передающих информацию об оборотах ротора, ходов насоса, температуры пластовой жидкости в области перфорации продуктивного пласта и др. В настоящее время активизировались НИОКР по разработке средств мониторинга следующего поколения, позволяющих получать и передавать в постоянном режиме информацию, для получения которой ранее требовалась остановка скважины с проведением исследований [15]. Создаются системы многофазного и виртуального измерения расхода [16, 17]. Система датчиков является базовой частью построения ЦДМ [18], что обусловливает критерии их отбора для внедрения, такие как точность и диапазон измерений, рабочая температура, время безотказной работы, размер и вес, защищенность корпуса, стабильность передачи данных. Первый уровень основан на автоматизации добычного промысла, в ходе которого происходит оснащение скважин и технологического оборудования месторождения системами телеметрии [19] и визуального наблюдения [20], с целью передачи цифровых данных с месторождения в режиме реального времени, что требует масштабного развития интернет-инфраструктуры, которая практически отсутствует во многих малонаселенных пунктах Восточной Сибири и Дальнего Востока. Внедрение технологий интернет-связи 5G (~5 Гбит/с) на всей территории России является среднесрочной задачей, в то время как в Китае активно развивается интернет с передачей данных со скоростью ~10 Гбит/с.

Второй уровень – это облачные сервера, собирающие и хранящие информацию с датчиков, объемы передачи которой достигают 2 Тб/час. Существуют проблемы непосредственно с серверным оборудованием, маршрутизаторами, компьютерами вследствие нарастающих санкций. В настоящее время в нефтегазовой отрасли используются серверов отечественного производства 6,3 %, коммутаторов – 10,2 %, систем хранения данных – 3,6 %, персональных компьютеров – 12,7 %. При том, что, согласно данным Росстата [21], использование информационных и коммуникационных технологий присутствует не во всех организациях (таблица).

Таблица.	Использование информационных и коммуни-				
	кационных технологий в организациях по ви-				
	ду экономической деятельности «Добыча				
	полезных ископаемых»				

Table.Use of information and communication technol-<br/>ogies in organizations by type of economic activi-<br/>ty "Mining"

	2	0				
2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
	Персонал	ьные ком	пьютеры/	Personal d	computers	
90,7	88,5	87,3	73,0	73,4	72,3	73,0
		Сер	веры/Serv	/ers		
69,1	65,1	64,8	51,0	45,3	45,0	41,9
Лог	кальные в	ычислите	ельные се	ги/Local с	omputer v	veb
73,3	69,5	69,2	56,3	55,7	53,5	
Глобаль	ные инфо	рмацион	ные сети/	Global info	ormation n	etworks
89,0	86,5	85,8	н.д	н.д	н.д	н.д
Сеть Интернет/Internet						
88,1	86,0	85,3		71,2	70,4	71,9
Фиксированный проводной/беспроводной интернет						
Fixed wired/wireless internet						
68,6	68,1	67,8	68,7	68,6	68,1	67,8
Мобильный интернет/Mobile internet						
н.д.	н.д	н.д	50,6	50,5	49,9	50,5
Организации, имеющие веб-сайт/Business with a web site						
39,7	37,4	40,4	32,0	33,2	32,2	32,4

Третий уровень - это обработка программным обеспечением различных данных, хранящихся на сервере. Нефтегазовые компании более активны в данном направлении. Например, ПАО «НК «Роснефть» создала комплекс корпоративных программных продуктов, таких как «РН-ГЕОСИМ», «Горизонт+», «Сигма» GPT-системы, «РН-СЕЙСМ», «РН-ПЕТРОЛОГ» и др. [22, 23]. Разрабатываются системы по оптимизации добычи с помощью интерпретации промысловой информации методами машинного обучения и искусственного интеллекта [24-27]. 2022 г. ознаменовал собой полномасштабное начало разработки программ цифровой трансформации в нефтегазовых компаниях, включающее такие направления, как цифровое месторождение, собственная платформа цифрового интернета, цифровая цепочка поставок, цифровой завод и др.

Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2025. Т. 336. № 5. С. 216–228 Карсаков А.В., Зятиков П.Н., Шарф И.В. Процессы развития технологии нефтегазовой отрасли с использованием...

Обычный промысел Traditional field	Интеллектуальный промысел Smart field				
Цифровая трансформация Digital transformation					
Оптимизация и управление Optimization and management	Интеллектуализация Intellectualization	Автоматическая оптимизация бизнес-процессов и быстрое принятие решений в реальном времени с помощью искусственного интеллекта. Automatic optimization of business process and quick real-time decision making			
Pасчет и анализ Calculation and analysis	Цифровизация Digitalization	Многовариантный прогноз и анализ с использова- нием цифрового двойника месторождения Multivariate forecast and analysis using the digital twin of the field			
Ручной ввод данных в стандартные формы отчётности Избирательный контроль Manual data entry in standard form Selective control	Верификация Verification	Создание адаптивной базы данных с автоматическим пополнением информацией и прохождением через алгоритмы верификации Creation of an adaptive database with automatic replenishment of information and passing verification algorithms			
Ручное управление промысловым оборудованием. Измерение и передача промысловых данных Manual control of field equipment. Measurement and transmission of field data	Автоматизация Automation	Диспетчерский контроль и управление. Дистанци- онное измерение и передача промысловых данных (телеметрия). Дистанционное управление работой промыслового оборудования (телемеханика) Dispatching control and management. Remote measurement and transmission of field data (telemetry). Remote operation control of field equipment (telemechanics)			

Рис. 2. Этапы цифровой трансформации при переходе к интеллектуальному промыслу

Fig. 2. Stages of digital transformation in the transition to intelligent field

#### От обычного промысла к интеллектуальному

В течение последних лет в нефтегазовой отрасли часто встречается понятие «умное месторождение» или «интеллектуальное месторождение» как термин, описывающий систему автоматического мониторинга и контроля физических процессов с последующей адаптацией интегральной модели в режиме реального времени [28]. Однако официально не определено, какие месторождения считать «умными». Большинство производств сейчас является во многом автоматизированным, однако ни одно не обходится без участия человека.

Переход к интеллектуальному управлению промыслом, как показано на рис. 2, не только влечет за собой изменение управления технологическим процессом добычи и переработки углеводородов, но и вызывает трансформацию существующих бизнес-процессов нефтегазового предприятия в целом.

Для интеллектуализации промысла необходимо его автоматизировать, что включает в себя дистанционный контроль и управление всеми объектами. Необходимо создать центр данных и обеспечить автоматическую оптимизацию процессов в реальном времени. Переход от традиционных неавтоматизированных промыслов к современным интеллектуальным осуществляется в четыре этапа.

- Автоматизированный промысел предполагает оснащение системами телеметрии и телемеханики, наличие диспетчерского контроля и оперативное управление (в т. ч. аварийная остановка) отдельными технологическими процессами и оборудованием по заданным алгоритмам.
- Верифицированный промысел обозначает развитие систем баз данных, в результате чего информация с систем телеметрии автоматически подгружается. Дополнительно необходимо прохождение входящих данных через алгоритмы автоматической верификации на предмет ошибочных значений и зашумленных результатов для их исключения из общей выборки информации.
- 3. Цифровой промысел предполагает интеграцию оцифрованных данных с базой данных, что обеспечивает возможность анализа текущей ситуации на основе мониторинга постоянно поступающей информации, а также позволяет моделировать все технологические процессы и, следовательно, прогнозировать варианты сценариев за счет расчета параметров всей системы добычи и подготовки УВ, что в совокупности определяет цифровизацию. Управление промыслом реализуется с применением телемеханики на основе результатов расчетов и согласо-

вания оптимального технологического режима между промысловыми подразделениями.

4. Интеллектуальный промысел характеризуется наличием искусственного интеллекта в самом широком смысле, задачей которого является автоматическая оптимизация как текущих, так и долгосрочных условий эксплуатации на основе многовариантных модельных расчетов, принимая во внимание заданные внешние параметры, такие как план добычи, экономические показатели, данные о персонале, оснащение и материально-технические ресурсы. Кроме того, он поддерживает автоматическое управление процессами в реальном времени.

Таким образом, основное отличие «интеллектуального» промысла от традиционного заключается в системе оперативного управления процессами добычи УВ, которая обеспечивает автоматическую оптимизацию производства за счет своевременного выявления возникающих проблем и принятия оптимальных решений в режиме реального времени.

Центральным элементом интеллектуальной системы управления разработкой месторождений УВ выступает программно-аппаратный комплекс [29]. Он гарантирует непрерывную работу ЦДМ для анализа всей необходимой промысловой информации, которая поступает в режиме реального времени посредством автоматизированных систем производства. В результате осуществляется:

- оперативное выявление любых отклонений от проектных параметров;
- определение эффективных управленческих решений на основе многовариантных прогнозных расчетов;
- самостоятельная реализация решений с помощью систем телемеханики (на первых этапах – с разрешения оператора, затем – под контролем оператора).

## Управленческий аспект создания интеллектуального промысла

Управленческий аспект интеллектуального промысла необходимо рассматривать с позиций совмещения функциональных обязанностей работников предприятия, искусственного интеллекта (ИИ) и других ЦТ. Оптимальной является трёхуровневая система: на уровне компании, добывающего предприятия (дочернего подразделения) и добычного промысла.

Цифровая трансформация актуализирует формирование центров на разных уровнях, объединяющих специалистов из разных сфер и ИИ. На базе ИИ могут быть созданы цифровой куратор для управления системой каждого уровня и цифровой помощник каждого работника, которые совершенствуются посредством машинного обучения с учетом меняющейся ситуация и появления разного рода задач.

Пилотными проектами по реализации интеллектуального промысла выступают два крупных газовых актива, добычу на которых осуществляют дочерние общества ПАО «НК "Роснефть"». В процессе реализации пилотных проектов планируется получение опыта оптимизации добычи и интеллектуального управления промыслами в различных условиях. Тиражирование технологии с охватом всех месторождений будет производиться после подтверждения работоспособности систем на этапе опытно-промышленной эксплуатации. По завершении опытно-промышленных испытаний компания получит готовую технологию интеллектуализации газового и газоконденсатного промыслов с подтвержденным эффектом на пилотных проектах и возможностью тиражирования на другие промыслы компании.

В рамках проекта планировалось:

- создание на установке комплексной подготовкь газа (УКПГ) высокопроизводительной САУП и организация ее взаимодействия со SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition/ Диспетчерское управление и сбор данных);
- установка на скважинах САР, обеспечивающих поддержание режимов работы скважин, заданных САУП, в т. ч. при сбоях в системах связи с УКПГ;
- применение высокоскоростного интегрированного моделирования и многоуровневой оптимизации;
- использование новых датчиков (дистанционный контроль обводнения скважин, сигнализатор эрозии и др.);
- применение технологий автоматической адаптации моделей и валидации поступающих данных;
- использование модуля экономического анализа в составе оптимизатора;
- формирование модульной концепции, позволяющей постепенно вовлекать в оптимизационный вычислительный цикл дополнительные производственные модули.

Ожидаемые ключевые эффекты следующие: а) прирост добычи газа по промыслу на ~3,2 % и конденсата на ~3 %; б) снижение расхода метанола на ~5 %. В рамках крупных месторождений подобный результат может принести значимый экономический эффект.

В настоящее время можно отметить, что работы в данном направлении ведут многие нефтегазодобывающие предприятия, совмещая параллельно разработки в области управления предприятием и системного инжиниринга с интеллектуализацией промысла [30–32]. Впоследствии системы могут оперативно дорабатываться, обеспечивая тем са-

мым ускоренный переход к итоговому интеллектуальному предприятию. Также цифровая трансформация активно внедряется в проектные организации, осуществляющие разработку технической документации, в начальные сегменты – ГРР, мониторинг и проектирование разработки, сопровождение бурения и создание проектной документации по обустройству месторождений [33-39]. Во многих направлениях большое внимание уделяется принципам формирования баз данных и верификации входящей информации [40-43]. Именно в рамках проектной деятельности на этапе работы с промысловой информацией обнаруживаются нефизичные и малодостоверные данные наблюдений или результаты исследований, что требует развития направления разработки механизмов работы с базой на основе стохастических моделей, методов машинного обучения или нейронных сетей с целью контроля входящей в базу информации.

## Обсуждение

С учетом освещения практических аспектов цифровой трансформации и интеллектуализации авторами предлагаются дефиниции цифровой трансформации и интеллектуализации с учетом специфики нефтегазовой отрасли. По мнению авторов, цифровую трансформацию в сегменте разведки и добычи можно рассматривать в узком и широком смысле. В узком смысле цифровая трансформация есть цифровизация, т. е. внедрение ЦТ в производственные процессы, что обусловливает изменение производственно-экономических показателей [44] на всех этапах технологической цепочки. Цифровая трансформация в широком смысле ориентирована на достижение стратегической задачи - сохранение конкурентоспособности в условиях усиливающихся по масштабам воздействия вызовов, является изменением существующей бизнес-модели, ориентированной на определенные рынки сбыта, продуктовые корзины, логистические карты, макроэкономические параметры и институциональное окружение. Аналогично может рассматриваться интеллектуализация. В узком смысле как цифровой инструмент для помощи в решении конкретных задач, в широком смысле как управленческая система, наделенная правами принятия и реализации решений.

Авторами выделятся три основных блока, внутри которых происходит цифровая трансформация (рис. 3). Протекающие внутриблоковые процессы являются одновременно параллельными и взаимозависимыми: внедрение и совершенствование самостоятельных технологий в одном блоке даёт толчок к развитию в других, которые в свою очередь открывают возможности к развитию качественно новых систем в целом по отрасли.



**Рис. 3.** Структура цифровой трансформации нефтегазовой отрасли

Fig. 3. Structure of the digital transformation of the oil and gas industry

Дополнительно стоит отметить типовую схему реализации цифровых проектов в нефтегазовой сфере [45], которая была дополнена по результатам изучения отечественного опыта: сбор информации – формирование базы данных – анализ и верификация данных – разработка цифрового продукта – оценка результатов работы – опробование на иных объектах – тиражирование. Текущие объемы промысловой информации требуют регулярного обновления архитектуры базы данных и ее автоматической экспресс-верификации.

Таким образом, анализ теоретико-практических аспектов в области цифровых процессов в нефтегазовой отрасли позволил авторам предложить следующие дефиниции. Цифровая трансформация нефтегазовой отрасли - это преобразование системы управления нефтегазовой компании и ее дочерних подразделений на основе цифровизации и интеллектуализации для оптимизации технологических процессов с целью сохранения конкурентоспособности компании в быстроменяющихся макроэкономических, макроэнергетических и институциональных условиях на мировом рынке УВ. Интеллектуализация нефтегазовой отрасли - трансформация в управлении нефтегазовой компанией, ее дочерними подразделениями и производственными участками на основе автоматизации и цифровизации всех процессов (производственных, технологических и управленческих) с целью их оптимизации, что позволит снизить операционные и капитальные издержки и улучшить производственноэкономические показатели, что в конечном итоге трансформирует всю бизнес-модель.

#### Заключение

На основании вышеизложенного можно резюмировать следующее.

- На основе анализа научного поля и статистической фактуры были выделены эффекты, получаемые от реализации цифровой трансформации и интеллектуализации в разведке и добыче нефтегазовых запасов. Обозначено отсутствие данных дефиниций в нормативно-правовых актах различной юридической силы и в отраслевых регламентах. Одним из результатов исследования являются предложенные определения цифровой трансформации и интеллектуализации, что можно рассматривать как дополнительный вклад в развитие научных основ управления в разведке и добыче углеводородов.
- Обозначено видение содержательных изменений в цифровой трансформации, отражающих поступательное движение от обычного промысла к интеллектуальному, что является стратегическим ориентиром в существующих и быстро-

меняющихся макроэкономических, макроэнергетических и институциональных условиях.

- 3. Представлено авторское видение встраивания инструментов цифровой трансформации и интеллектуализации в разноуровневое управление интеллектуальным промыслом посредством цифрового куратора и цифрового помощника.
- Представлена блочная структура цифровой трансформации отрасли, учитывающая сферы подготовки проектно-технической документации, добычи и управления предприятием.
- Выделены основные этапы создания цифровых технологий, среди которых отдельно обозначены сегменты формирования базы данных и контроля входящей информации с учетом тенденции к повышению объемов и видов поступающих данных.

# СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Путеводитель по санкциям и ограничениям против Российской Федерации (после 22 февраля 2022 г.). URL: https://base.garant.ru/57750632/ (дата обращения: 29.01.2025).
- Итоги международного форума «Российская энергетическая неделя 2024». URL: https://cdnweb.roscongress.org/ upload/medialibrary/658/5j1tdmlw5wh5isv0swfw72j71c93inck/Summary\_REW24.pdf?17340923772532115 (дата обращения: 29.01.2025).
- 3. Себестоимость добычи нефти. URL: https://rosstat.gov.ru/folder/11189 (дата обращения: 29.01.2025).
- 4. Указ Президента РФ от 07.05.2024 № 309 «О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года и на перспективу до 2036 года». URL: https://www.consultant.ru/law/hotdocs/84648.html (дата обращения: 29.01.2025).
- 5. Распоряжение Правительства РФ от 9 июня 2020 г. № 1523-р «Об утверждении Энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2035 года». URL: https://www.consultant.ru/document/cons\_doc\_LAW\_354840/ (дата обращения: 29.01.2025).
- 6. Указ Президента Российской Федерации от 4 ноября 2020 г. № 666 «О сокращении выбросов парниковых газов». URL: http://www.kremlin.ru/acts/bank/45990 (дата обращения: 29.01.2025).
- 7. Федеральный закон от 30.11.2024 № 419-ФЗ «О федеральном бюджете на 2025 год и на плановый период 2026 и 2027 годов». URL: https://www.consultant.ru/document/cons doc LAW 491969/ (дата обращения: 29.01.2025).
- 8. Байкова О.В., Громыко Е.О. Эффекты цифровой трансформации в нефтегазовом комплексе // Вестник университета. 2021. № 6. С. 77–81. DOI: 10.26425/1816-4277-2021-6-77-81.
- Худаяров Т.А. Рост производительности труда в нефтегазовом комплексе путем использования современных цифровых технологий // Human Progress. – 2021. – Т. 7. – Вып. 3. DOI: 10.34709/IM.173.13. URL: http://progresshuman.com/images/2021/Tom7\_3/Khudayarov.pdf (дата обращения: 29.01.2025).
- Цифровые двойники нефтегазового месторождения и актива: что они могут дать отрасли и что нужно, чтобы их создать. URL: https://www.zyfra.com/ru/news/media/tsifrovye-dvoiniki-neftegazovogo-mestorozhdeniia-i-aktiva-chto-oni-mogut-datotrasli-i-chto-nuzhno-chtoby-ikh-sozdat/ (дата обращения: 29.01.2025).
- 11. Саак А.Э., Пахомов Е.В. Ключевые технологии Индустрии 4.0, Общества 5.0, Экономики 3.0 // Инженерный вестник Дона. 2020. № 2. URL: http://wwvv.ivdon.ru/ru/magazine/archive/N2y2020/6324 (дата обращения: 29.01.2025).
- Будущее нефтегазовой отрасли через призму цифровых технологий / С. Ибрагимова, Д. Олимов, Ж. Салиев, X. Ибрагимов. URL: https://iais.uz/ru/outputnew/buduschee-neftegazovoy-otrasli-cherez-prizmu-tsifrovyh-tehnologiy (дата обращения: 29.01.2025).
- 13. Бекетова О.Н. Стратегирование цифровой трансформации нефтегазовых предприятий // Стратегирование: теория и практика. 2023. Т. 3. № 4. С. 428–440. DOI: 10.21603/2782-2435-2023-3-4-428-440.
- 14. Санкова Л.В. Нефтегазовый комплекс на современном этапе: проблемы и перспективы цифровой трансформации // Актуальные проблемы экономики и менеджмента. 2021. № 1 (29). С. 97–109.
- 15. Результативность глубинного распределённого оптоволоконного мониторинга работы горизонтальных скважин, оборудованных установками электроцентробежного насоса, в «Газпром нефти» / А.И. Ипатов, М.И. Кременецкий, Э.Р. Худиев, А.Ю. Губарев, С.А. Скопинов, В.В. Соловьева, Д.Н. Гуляев // Нефтяное хозяйство. 2023. № 12. С. 58–63. DOI: 10.24887/0028-2448-2023-12-58-63.
- Multiphase flow meters targeting oil & gas industries / M. Meribout, A. Azzi, N. Ghendour, N. Kharoua, L. Khezzar, E. AlHosani // Measurement. 2020. Vol. 165. 108111. DOI: 10.1016/j.measurment.2020.108111.
- 17. Bikmukhametov T., Jaschke J. First principles and machine learning virtual flow metering: a literature review // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2019. Vol. 184. 106487. DOI: 10.1016/j.petrol.2019.106487.
- 18. Rabbani A., Babaei M., Javadpour F. A Triple Pore Network Model (T-PNM) for gas flow simulation in fractured, micro-porous and meso-porous media // Transport in Porous Media. 2020. Vol. 132. P. 707–740. DOI: 10.1007/s11242-020-01409-w.

- 19. Еремин Н.А., Столяров В.Е., Сафарова Е.А. Строительство цифрового месторождения с использованием оптоволоконных технологий // Нефть. Газ. Новации. 2022. № 11. С. 20–26.
- 20. Kon T.E. The importance of the use of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) in the oil and gas industry // Petroleum Science and Engineering. 2024. Vol. 8 (2). P. 63-69. DOI: 10.11648/j.pse.20240802.11.
- Информационные и телекоммуникационные технологии. URL: https://03.rosstat.gov.ru/storage/mediabank/ ege2023\_21.pdf?ysclid=m6yw8wv1fr934859128 (дата обращения: 29.01.2025).
- 22. Единая информационная система геолого-геофизических данных основа мультидисциплинарного подхода к разведке и добыче углеводородов / О.Б. Кузьмичев, Р.К. Газизов, С.В. Власов, М.С. Антонов // Нефтяное хозяйство. 2024. № 2. С. 8–13. DOI: 10.24887/0028-2448-2024-2-8-13.
- Новые инструменты ПАО «НК «Роснефть» для повышения эффективности проектирования: искусственный интеллект / Д.Г. Дидичин, В.А. Павлов, Н.О. Вахрушева, О.А. Филимонова // Нефтяное хозяйство. – 2023. – № 11. – С. 50–55. DOI: 10.24887/0028-2448-2023-11-50-55.
- Predictive model for bottomhole pressure based on machine learning / P. Spesivtsev, K. Sinok, I. Sofronov, A. Zimina, A. Umnov, R. Yarillin, D. Vetrov // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2018. – Vol. 166. – P. 825–841. DOI: 10.1016/j.petrol.2018.03.046.
- 25. Intelligent logging lithological interpretation with convolution neural networks / L. Zhu, H. Li, Zh. Yang, Ch. Li, Y. Ao // Petrophysics. 2018. Vol. 59. P. 799-810. DOI: 10.30632/PJV59N6-2018a5.
- 26. Research on the application of Bayesian machine learning in reservoir prediction / Zh. Fu, K. Chen, J. Liao, L. Long, D. Peng // Petroleum Science and Engineering. 2023. Vol. 7 (2). P. 35–42. DOI: 10.11648/j.pse.20230702.12.
- 27. Umana U.K., Okon A.N., Agwu O.E. Simplified neural network-based models for oil flow rate prediction // Petroleum Science and Engineering. 2024. Vol. 8 (2). P. 70–99. DOI: 10.11648/j.pse.20240802.12.
- 28. Проблемы развития цифровой энергетики в России / Н.И. Воропай, М.В. Губко, С.П. Ковалев, Л.В. Массель, Д.А. Новиков, А.Н. Райков, С.М. Сендеров, В.А. Стенников // Проблемы управления. 2019. № 1. С. 2–14. DOI: 10.25728/pu.2019.1.1.
- 29. A big data analytics approach to develop industrial symbioses in large cities / B. Song, Y. Zhiquan, L.S.Ch. Jonathan, D.K. Jiewei, D. Kurle, F. Cerdas, Ch. Herrmann // Procedia CIRP 29. 2015. P. 450–455. DOI: 10.1016/j.procir.2015.01.066.
- 30. Бенчмаркинг инструмент системной работы по повышению эффективности (потенциала) в «Газпром нефти» / А.Ф. Можчиль, Н.З. Базылева, И.В. Янина, Ф.А. Герасимов, П.В. Козловский, А.В. Перов // Нефтяное хозяйство. 2023. № 12. С. 6–11. DOI: 10.24887/0028-2448-2023-12-6-11.
- Project Gradient a tool for comparative Analysis and Potential Search / N. Bazyleva, A. Mozhchil, L. Pashkevich, I. Yanina, O. Skudar, M. Pislegin, F. Gerasimov, P. Kozlovskii // Petroleum Technology Conference. – Riyadh, Saudi Arabia, 2022. DOI: 10.2523/IPTC-22447-MS.
- 32. Evaluating the cost efficiency of systems engineering in oil and gas projects / I. Glukhikh, A. Mozhchil, M. Prisaev, O. Azrykulov, K. Nonieva // Applied system innovation. 2020. № 3 (3). 39. DOI: 10.3390/asi3030039.
- 33. Ольнева Т.В., Орешникова М.Ю. Применение нейронных сетей для идентификации палеоканалов и генерации их концептуальных моделей // Нефтяное хозяйство. 2023. № 12. С. 17–19. DOI: 10.24887/0028-2448-2023-12-17-19.
- 34. Методы Data Mining как система поддержки принятия решений в условиях ограничения данных / В.А. Маркин, Л.В. Маркина, В.Р. Байрамов, М.Ю. Лобанок // Нефтяное хозяйство. 2024. № 5. С. 138–142. DOI: 10.24887/0028-2448-2024-5-138-142.
- 35. Применение методов машинного обучения для петрофизической интерпретации сложнопостроенного геологического разреза / М.А. Басыров, А.В. Сергейчев, И.Д. Латыпов, Э.И. Уразметова, А.А. Астафьев, А.В. Марков, А.Н. Воронина, Г.Г. Елкибаева, А.Э. Федоров // Нефтяное хозяйство. 2024. № 3. С. 20–25. DOI: 10.24887/0028-2448-2024-3-20-25.
- 36. Методика подбора аналогов моделей РVТ пластового флюида и экспресс-оценка параметров РVТ для новых активов / В.В. Ким, Н.О. Матрошилов, К.А. Печко, А.А. Афанасьев, М.В. Симонов // Нефтяное хозяйство. 2023. № 12. С. 36–39. DOI: 10.24887/0028-2448-2023-12-36-39.
- 37. A predictive model for steady-state multiphase pipe flow machine learning on lab data / E.A. Kanin, A.A. Osiptsov, A.L. Vainshtein, E.V. Burnaev // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2019. – Vol. 180. – P. 727–746. DOI: 10.1016/j.petrol.2019.05.055.
- 38. Modeling of integrated energy supply systems: main principles, model, and applications / N. Voropai, V. Stennikov, S. Senderov, E. Barakhtenko, O. Voitov, A. Ustinov // Journal of Energy Engineering. – 2017. – Vol. 143. – № 5. – P. 1–11. DOI: 10.1061/(ASCE)EY.1943-7897.0000443.
- 39. Scale effect on the reservoir permeability and porosity over a wide range of void structure (example of the Tedinskoye oil field) / I. Putilov, A. Yuriev, N. Popov, D. Chizov // Arctic Environmental Research. 2019. Vol. 19. № 3. P. 93–98. DOI: 10/3897/issn2541-8416.2019.19.3.93.
- Experience with Using Data Analysis Technologies in identification of lost production zones / O. Nadezhdin, D. Efimov, L. Minikeeva, A. Markov // SPE Russian Petroleum Technology Conference. – Moscow, Russia, 2018. DOI: 10.2018/191597-18RPTC-MS.
- 41. Application of machine learning in integrated modeling of the oil and gas fields / K. Pechko, A. Afanasyev, N. Brovin, E. Belonogov, M. Simonov // Third EAGE Digitalization Conference and Exhibition. European Association of Geoscientists & Engineers, 2023. P. 1–4. DOI: 10.3997/2214-4609.202332061.
- 42. Okon A.N., Effiong A.J., Daniel D.D. Explicit neural network-based models for bubble point pressure and oil formation volume factor prediction // Arabian Journal for Science and Engineering. 2023. Vol. 48. P. 9221–9257. DOI: 10.1007/s13369-022-07240-3.
- 43. Al-Fakih A., Kaka S. Application of artificial intelligence in static formation temperature estimation // Arabian Journal for Science and Engineering. 2023. Vol. 48. P. 16791–16804. DOI: 10.1007/s13369-023-08096-x.

- 44. Анисимова Я.А., Плотников В.А. Перспективы цифровой трансформации в нефтяной промышленности // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Экономика. Социология. Менеджмент. 2022. Т. 12. № 5. С. 106–119. DOI: 10.21869/2223-1552-2022-12-5-106-119.
- 45. Анализ перспектив развития цифровых технологий нефтегазовых месторождений / С.Г. Мухаметдинова, А.И. Коршунов, Н.О. Вахрушева, Т.Н. Иванова // Нефть. Газ. Новации. 2022. № 11. С. 34–41.

#### Информация об авторах

**Александр Владиславович Карсаков**, аспирант Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. Avk163@tpu.ru; https://orcid.org/0000-0002-5804-2460

**Павел Николаевич Зятиков**, доктор технических наук, профессор физико-технического факультета Национального исследовательского Томского государственного университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36. zpavel@tpu.ru; https://orcid.org/0000-0003-3926-3206

**Ирина Валерьевна Шарф**, доктор экономических наук, профессор отделения нефтегазового дела Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. Irina\_sharf@mail.ru; https://orcid.org/0000-0002-1333-1234

Поступила в редакцию: 10.03.2025 Поступила после рецензирования: 20.03.2025 Принята к публикации: 10.04.2025

## REFERENCES

- 1. Guide to sanctions and restrictions against the Russian Federation (after February 22, 2022). (In Russ.) Available at: https://base.garant.ru/57750632/ (accessed 29 January 2025).
- 2. Results of the international forum «Russian Energy Week 2024». (In Russ.) Available at: https://cdnweb.roscongress.org/upload/medialibrary/658/5j1tdmlw5wh5isv0swfw72j71c93inck/Summary\_REW24.pdf?1734092 3772532115 (accessed 29 January 2025).
- 3. Cost of oil production. (In Russ.) Available at: https://rosstat.gov.ru/folder/11189 (accessed 29 January 2025).
- 4. Decree of the President of the Russian Federation dated 05/07/2024 No. 309 «On the national development goals of the Russian Federation for the period until 2030 and for the future until 2036». (In Russ.) Available at: https://www.consultant.ru/law/hotdocs/84648.html (accessed 29 January 2025).
- Order of the Government of the Russian Federation of June 9, 2020 No. 1523-r «On approval of the Energy Strategy of the Russian Federation for the period until 2035». (In Russ.) Available at: https://www.consultant.ru/document/cons\_doc\_LAW\_354840/ (accessed 29 January 2025).
- 6. Decree of the President of the Russian Federation of November 4, 2020 No. 666 «On reducing greenhouse gas emissions». (In Russ.) Available at: http://www.kremlin.ru/acts/bank/45990 (accessed 29 January 2025).
- 7. Federal Law of November 30, 2024 N 419-FZ «On the federal budget for 2025 and for the planning period of 2026 and 2027». (In Russ.) Available at: https://www.consultant.ru/document/cons\_doc\_LAW\_491969/ (accessed 29 January 2025).
- 8. Baykova O.V., Gromyko E.O. Effects of digital transformation in the oil and gas complex. *Vestnik universiteta*, 2021, no. 6, pp. 77–81. (In Russ.) DOI: 10.26425/1816-4277-2021-6-77-81.
- Khudayarov T. Labor productivity in the oil and gas field with the use of modern digital technologies. *Human Progress*, 2021, vol. 7, Iss. 3. (In Russ.) DOI: 10.34709/IM.173.13. Available at: http://progress-human.com/images/2021/Tom7\_3/ Khudayarov.pdf. (accessed 29 January 2025).
- 10. Digital twins of oil and gas fields and assets: what they can give to the industry and what is needed to create them. (In Russ.) Available at: https://www.zyfra.com/ru/news/media/tsifrovye-dvoiniki-neftegazovogo-mestorozhdeniia-i-aktiva-chto-oni-mogut-dat-otrasli-i-chto-nuzhno-chtoby-ikh-sozdat/ (accessed 29 January 2025).
- 11. Saak A.E., Pakhomov E.V. Key technologies of Industry 4.0, Society 5.0, Economy 3.0. *Engineering journal of Don*, 2020, no. 2. (In Russ.) Available at: http://wwvv.ivdon.ru/ru/magazine/archive/N2y2020/6324 (accessed 29 January 2025).
- 12. Ibragimova S., Olimov D., Saliev Zh., Ibragimov Kh. *The future of the oil and gas industry through the prism of digital technologies*. (In Russ.) Available at: https://iais.uz/ru/outputnew/buduschee-neftegazovoy-otrasli-cherez-prizmu-tsifrovyh-tehnologiy (accessed 29 January 2025).
- 13. Beketova O.N. Strategizing the digital transformation of oil and gas enterprises. *Strategizing: Theory and Practice*, 2023, vol. 3, no. 4, pp. 428–440. (In Russ.) DOI: 10.21603/2782-2435-2023-3-4-428-440.
- 14. Sankova L.V. The oil and gas industry nowadays: Digital transformation problems and prospects. *Actual problems of Economics and Management*, 2021, no. 1, pp. 97–109. (In Russ.)
- 15. Ipatov A.I., Kremenetsky M.I., Khudiev E.R., Gubarev A.Yu., Skopinov S.A., Solovieva V.V., Gulyaev D.N. The effectiveness of downhole distributed fiber-optic monitoring of ESP horizontal wells production in the Gazprom Neft. *Oil Industry Journal*, 2023, no. 12, pp. 58–63. (In Russ.) DOI: 10.24887/0028-2448-2023-12-58-63.
- 16. Meribout M., Azzi A., Ghendour N., Kharoua N., Khezzar L., AlHosani E. Multiphase Flow Meters Targeting Oil & Gas Industries. *Measurement*, 2020, vol. 165, 108111. DOI: 10.1016/j.measurment.2020.108111.
- 17. Bikmukhametov T., Jaschke J. First principles and machine learning virtual flow metering: a literature review. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2019, vol. 184, 106487. DOI: 10.1016/j.petrol.2019.106487.

- 18. Rabbani A., Babaei M., Javadpour F. A Triple Pore Network Model (T-PNM) for gas flow simulation in fractured, micro-porous and meso-porous media. *Transport in Porous Media*, 2020, vol. 132, pp. 707–740. DOI: 10.1007/s11242-020-01409-w.
- 19. Eremin N.A., Stolyarov V.E., Safarova E.A. Construction of a digital field based on the use of fiber-optic technologies. *Neft. Gas. Novatsii*, 2022, no. 11, pp. 20–26. (In Russ.)
- 20. Kon T.E. The importance of the use of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) in the oil and gas industry. *Petroleum Science and Engineering*, 2024, vol. 8 (2), pp. 63–69. DOI: 10.11648/j.pse.20240802.11.
- 21. Information and telecommunication technologies. (In Russ.) Available at: https://03.rosstat.gov.ru/storage/mediabank/ ege2023\_21.pdf?ysclid=m6yw8wv1fr934859128 (accessed 29 January 2025).
- Kuzmichev O.B., Gazizov R.K., Vlasov S.V., Antonov M.S. The unified information system of geological and geophysical data is the basis of a multidisciplinary approach to the exploration and production of hydrocarbons. *Oil Industry Journal*, 2024, no. 2, pp. 8–13. (In Russ.) DOI: 10.24887/0028-2448-2024-2-8-13.
- Didichin D.G., Pavlov V.A., Vahrusheva N.O., Filimonova O.A. New tools of Rosneft Oil Company to improve the efficiency of design: artificial intelligence. *Oil Industry Journal*, 2023, no. 11, pp. 50–55. (In Russ.) DOI: 10.24887/0028-2448-2023-11-50-55.
- 24. Spesivtsev P., Sinok K., Sofronov I., Zimina A., Umnov A., Yarillin R., Vetrov D. Predictive model for bottomhole pressure based on machine learning. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2018, vol. 166, pp. 825–841. DOI: 10.1016/j.petrol.2018.03.046.
- 25. Zhu L., Li H., Yang Zh., Li Ch., Ao Y. Intelligent logging lithological interpretation with convolution neural networks. *Petrophysics*, 2018, vol. 59, pp. 799–810. DOI: 10.30632/PJV59N6-2018a5.
- 26. Fu Zh., Chen K., Liao J., Long L., Peng D. Research on the Application of Bayesian Machine Learning in Reservoir Prediction. *Petroleum Science and Engineering*, 2023, vol. 7 (2), pp. 35–42. DOI: 10.11648/j.pse.20230702.12.
- Umana U.K., Okon A.N., Agwu O.E. Simplified Neural Network-Based Models for Oil Flow Rate Prediction. *Petroleum Science* and Engineering, 2024, vol. 8 (2), pp. 70–99. DOI: 10.11648/j.pse.20240802.12.
- Voropaj N.I., Gubko M.V., Kovalev S.P., Massel' L.V., Novikov D.A., Rajkov A.N., Senderov S.M., Stennikov V.A. Problems of digital energy development in Russia. *Control Sciences*, 2019, no. 1, pp. 2–14. (In Russ.) DOI: 10.25728/pu.2019.1.1.
- 29. Bin S., Zhiquan Y., Jonathan L.S.C., Jiewei D.K., Kurle D., Cerdas F., Herrmann Ch. A big data analytics approach to develop industrial symbioses in large cities. *Procedia CIRP* 29, 2015, pp. 450–455. DOI: 10.1016/j.procir.2015.01.066.
- Mozhchil A.F., Bazyleva N.Z., Yanina I.V., Gerasimov F.A., Kozlovsky P.V., Perov A.V. Benchmarking as a tool for systematic work on improving the efficiency (potential) at Gazprom Neft. *Oil Industry Journal*, 2023, no. 12, pp. 6–11. (In Russ.) DOI: 10.24887/0028-2448-2023-12-6-11.
- Bazyleva N., Mozhchil A., Pashkevich L., Yanina I., Skudar O., Pislegin M., Gerasimov F., Kozlovskii P. Project Gradient a tool for comparative analysis and potential search. *Petroleum Technology Conference*. Riyadh, Saudi Arabia, 2022. DOI: 10.2523/IPTC-22447-MS.
- 32. Glukhikh I., Mozhchil A., Prisaev M., Azrykulov O., Nonieva K. Evaluating the Cost Efficiency of Systems Engineering in Oil and Gas Projects. *Applied system innovation*, 2020, no. 3 (3), 39. DOI: 10.3390/asi3030039.
- 33. Olneva T.V., Oreshkova M.Yu. Application of neural networks to identify paleochannels and generate their conceptual models. *Oil Industry Journal*, 2023, no. 12, pp. 17–19. (In Russ.) DOI: 10.24887/0028-2448-2023-12-17-19.
- 34. Markin V.A., Markina L.V., Bayramov V.R., Lobanok M.Yu. Data Mining methods as a decision support system under conditions of data limitation. *Oil Industry Journal*, 2024, no. 5, pp. 138–142. (In Russ.) DOI: 10.24887/0028-2448-2024-5-138-142.
- 35. Basyrov M.A., Sergeichev A.V., Latypov I.D., Urazmetova E.I., Astafiev A.A., Markov A.V., Voronina A.N., Elkibaeva G.G., Fedorov A.E. Application of machine learning methods for the petrophysical interpretation of complex geological section. *Oil Industry Journal*, 2024, no. 3, pp. 20–25. (In Russ.) DOI: 10.24887/0028-2448-2024-3-20-25.
- 36. Kim V.V., Matroshilov N.O., Pechko K.A., Afanasev A.A., Simonov M.V. Methodology for selecting analogs of reservoir fluid PVT models and rapid estimation of PVT parameters for new assets. *Oil Industry Journal*, 2023, no. 12, pp. 36–39. (In Russ.) DOI: 10.24887/0028-2448-2023-12-36-39.
- 37. Kanin E.A., Osiptsov A.A., Vainshtein A.L., Burnaev E.V. A predictive model for steady-state multiphase pipe flow machine learning on lab data. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2019, vol. 180, pp. 727–746. DOI: 10.1016/j.petrol.2019.05.055.
- 38. Voropai N., Stennikov V., Senderov S., Barakhtenko E., Voitov O., Ustinov A. Modeling of integrated energy supply systems: main principles, model, and applications. *Journal of Energy Engineering*, 2017, vol. 143, no. 5, pp. 1–11. DOI: 10.1061/(ASCE)EY.1943-7897.0000443.
- Putilov I., Yuriev A., Popov N., Chizov D. Scale effect on the reservoir permeability and porosity over a wide range of void structure (example of the Tedinskoye oil field). *Arctic Environmental Research*, 2019, vol. 19, no. 3, pp. 93–98. DOI: 10/3897/issn2541-8416.2019.19.3.93.
- 40. Nadezhdin O., Efimov D., Minikeeva L., Markov A. Experience with using data analysis technologies in identification of lost production zones. *SPE Russian Petroleum Technology Conference*. Moscow, Russia, 2018. DOI: 10.2018/191597-18RPTC-MS.
- Pechko K., Afanasyev A., Brovin N., Belonogov E., Simonov M. Application of machine learning in integrated modeling of the oil and gas fields. *Third EAGE Digitalization Conference and Exhibition*. European Association of Geoscientists & Engineers, 2023. pp. 1–4. DOI: 10.3997/2214-4609.202332061.
- 42. Okon A.N., Effiong A.J., Daniel D.D. Explicit neural network-based models for bubble point pressure and oil formation volume factor prediction. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2023, vol. 48, pp. 9221–9257. DOI: 10.1007/s13369-022-07240-3.
- 43. Al-Fakih A., Kaka S. Application of artificial intelligence in static formation temperature estimation. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2023, vol. 48, pp. 16791–16804. DOI: 10.1007/s13369-023-08096-x.
- 44. Anisimova Ya.A., Plotnikov V.A. Prospects and prerequisites for digital transformation in the oil industry. *Proceedings of the Southwest State University. Series: Economy. Sociology. Management*, 2022, vol. 12, no. 5, pp. 106–119. (In Russ.) DOI: 10.21869/2223-1552-2022-12-5-106-119.
- 45. Mukhametdinova S.G., Korshunov A.I., Vakhrusheva N.O., Ivanova T.N. Analysis of the digital oil and gas development prospects. *Neft. Gas. Novatsii*, 2022, no. 11, pp. 34–41. (In Russ.)

## Information about the authors

**Alexander V. Karsakov**, Postgraduate Student, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. Avk163@tpu.ru; https://orcid.org/0000-0002-5804-2460

**Pavel N. Zyatikov**, Dr. Sc., Professor, National Research Tomsk State University, 36, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. zpavel@tpu.ru; https://orcid.org/0000-0003-3926-3206

**Irina V. Sharf**, Dr. Sc., Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. Irina\_sharf@mail.ru; https://orcid.org/0000-0002-1333-1234

Received: 10.03.2025 Revised: 20.03.2025 Accepted: 10.04.2025 УДК 535-34 DOI: 10.18799/24131830/2025/5/5122 Шифр специальности ВАК: 1.3.6 Обзорная статья

# «Микрофокус» – первая станция в России для сочетания рентгеновских когерентных и некогерентных методов в геологии и геохимии

# Я.В. Ракшун<sup>1,2,3⊠</sup>, Ю.В. Хомяков<sup>2,7</sup>, Е.И. Глушков<sup>4</sup>, А.С. Гоголев<sup>5</sup>, М.В. Горбачев<sup>6</sup>, А.В. Дарьин<sup>1</sup>, Ф.А. Дарьин<sup>7</sup>, И.П. Долбня<sup>8</sup>, С.В. Ращенко<sup>1,9</sup>, В.А. Чернов<sup>2</sup>, Н.И. Чхало<sup>4</sup>, М.Р. Шарафутдинов<sup>7</sup>

<sup>1</sup> Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук, Россия, г. Новосибирск

<sup>2</sup> Институт ядерной физики имени. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук, Россия, г. Новосибирск

<sup>3</sup> Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Россия, г. Новосибирск <sup>4</sup> Институт физики микроструктур Российской академии наук, Россия, г. Нижний Новгород <sup>5</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск <sup>6</sup> Новосибирский государственный технический университет, Россия, г. Новосибирск

<sup>с</sup> повосиоирскии госубарственный технический университет, Россия, г. повосиоирс 7 Центр коллективного пользования «Сибирский кольцевой источник фотонов»

Института катализа им. Г.К. Борескова Сибирского отделения Российской академии наук,

итута катализа им. 1.К. Борескова Сибирского отбеления Российской акабемии на

Россия, Новосибирская область, р.п. Кольцово

<sup>8</sup> Diamond Light Source, Великобритания, г. Дидкот

<sup>9</sup> Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, Россия, г. Новосибирск

# <sup>⊠</sup>rakshun@mail.ru

Аннотация. Строительство источника синхротронного излучения ЦКП «СКИФ» с ультрамалым эмиттансом электронного пучка открывает широкие перспективы для использования ондуляторного излучения в геологических и геохимических исследованиях. Рост яркости излучения позволяет реализовать когерентные (фазочувствительные) высокоразрешающие методы микроскопии, в том числе птихографию и птихотомографию. Становится возможным исследовать тонкую структуру микрообъектов (включений, минеральных зёрен и др.) с нанометровым пространственным разрешением, что позволит восстанавливать сложные геологические истории минералов, связанные с формированием различных пород. Двух- и трёхмерное рентгенофлуоресцентное микрокартирование, в том числе в конфокальной схеме, даёт комплементарную информацию о химическом составе минералов и включений, позволяет идентифицировать отдельные фазы. Комбинация конфокальной флуоресцентной микроскопии и микро-спектроскопии XANES позволит получать дополнительную информацию о локальной структуре и валентности элементов в точке исследования, решая задачу экспрессного восстановления минерального состава руд и осадков. Кроме того, становятся доступны методы in situ монокристальной микродифракции в алмазных наковальнях, актуальные для изучения высокобарических фазовых переходов и реакций, в том числе глубинных процессов рудообразования. Описан обновленный проект ондуляторной станции 1-1 «Микрофокус» ЦКП «СКИФ», включающий реализуемый набор экспериментальных методов, согласованную рентгенооптическую схему, режимы работы, сценарии эксперимента и ожидаемые параметры пучков излучения на образце. Обоснованы оптические и тепломеханические решения, оценены достижимые пространственные разрешения. Показана реализуемость сочетания «когерентных» и «традиционных» методов в жестком рентгеновском диапазоне - «мультимодальность» станции при исследовании одного образца.

**Ключевые слова:** микродифракция, конфокальная флуоресцентная микроскопия, спектро-микроскопия, микро-XANES, птихография

Благодарности: Работа поддержана государственными заданиями Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН (122041400176-0 и 122041400214-9), грантом Российского научного фонда № 23-77-10047, государственным заданием ЦКП "СКИФ" Института катализа им. Г.К. Борескова СО РАН (FWUR-2024-0042), государственным заданием Института ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН (FWGM-2025-0036).

**Для цитирования:** «Микрофокус» – первая станция в России для сочетания рентгеновских когерентных и некогерентных методов в геологии и геохимии / Я.В. Ракшун, Ю.В. Хомяков, Е.И. Глушков, А.С. Гоголев, М.В. Горбачев, А.В. Дарьин, Ф.А. Дарьин, И.П. Долбня, С.В. Ращенко, В.А. Чернов, Н.И. Чхало, М.Р. Шарафутдинов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 5. – С. 229–251. DOI: 10.18799/24131830/2025/5/5122

UDC 535-34 DOI: 10.18799/24131830/2025/5/5122 Review article

# "Microfocus" is the first Russian beamline for combining X-ray coherent and incoherent methods for application in geology and geochemistry

# Ya.V. Rakshun<sup>1,2,3⊠</sup>, Yu.V. Khomyakov<sup>2,7</sup>, E.I. Glushkov<sup>4</sup>, A.S. Gogolev<sup>5</sup>, M.V. Gorbachev<sup>6</sup>, A.V. Darin<sup>1</sup>, F.A. Darin<sup>7</sup>, I.P. Dolbnya<sup>8</sup>, S.V. Rashchenko<sup>1,9</sup>, V.A. Chernov<sup>2</sup>, N.I. Chkhalo<sup>4</sup>, M.R. Sharafutdinov<sup>7</sup>

<sup>1</sup> V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation
 <sup>2</sup> Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation
 <sup>3</sup> Siberian State University of Telecommunications and Information Science, Novosibirsk, Russian Federation
 <sup>4</sup> Institute for Physics of Microstructures RAS, Nizhny Novgorod, Russian Federation
 <sup>5</sup> National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation
 <sup>6</sup> Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russian Federation
 <sup>7</sup> SRF "SKIF", Novosibirsk region, Koltsovo, Russian Federation
 <sup>8</sup> Diamond Light Source, Didcot, United Kingdom
 <sup>9</sup> Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation

<sup>⊠</sup>rakshun@mail.ru

Abstract. Synchrotron radiation facility «SKIF» with an ultra-low electron beam emittance opens up broad prospects for the use of undulator radiation in geological and geochemical studies. The increase in the radiation brightness allows one to implement coherent (phase-sensitive) high-resolution microscopy methods, including ptychography and ptychotomography. It becomes possible to study the fine structure of micro-objects (inclusions, mineral grains, etc.) with nanometer-scale spatial resolution, which allows for reconstruction of the complex geological histories of minerals associated with the formation of various rocks. Two- and three-dimensional traditional and confocal X-ray fluorescence micromapping provides complementary information on the chemical composition of minerals and inclusions, and allows one to identify the individual phases. The combination of confocal fluorescence microscopy and XANES microspectroscopy will provide additional information on the local structure and valence of elements at the study point, solving the problem of express restoration of the mineral composition of ores and sediments. In addition, in situ methods of single-crystal microdiffraction in diamond anvils are becoming available, which are relevant for studying high-pressure phase transitions and reactions, including deep ore formation processes. The paper describes an updated project of the 1-1 "Microfocus" undulator-based beamline of SRF «SKIF», including a set of implemented experimental methods, a coordinated X-ray optical layout, operational modes, experimental scenarios and expected parameters of radiation beams at the sample. The authors substantiated optical and thermal-mechanical solutions, estimated achievable spatial resolutions. The paper demonstrates feasibility of combining "coherent" and "traditional" methods in the hard X-ray range, i. e. "multimodality" of the beamline.

Keywords: microdiffraction, confocal fluorescence microscopy, spectro-microscopy, micro-XANES, ptychography

**Acknowledgements:** This work was partially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the governmental order for V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS (122041400176-0 and 122041400214-9), SRF SKIF Boreskov Institute of Catalysis SB RAS (FWUR-2024-0042) and Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS (FWGM-2025-0036).

**For citation**: Rakshun Ya.V., Khomyakov Yu.V., Glushkov E.I., Gogolev A.S., Gorbachev M.V., Darin A.V., Darin F.A., Dolbnya I.P., Rashchenko S.V., Chernov V.A., Chkhalo N.I., Sharafutdinov M.R. "Microfocus" is the first Russian beamline for combining X-ray coherent and incoherent methods for application in geology and geochemistry. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 5, pp. 229–251. DOI: 10.18799/24131830/2025/5/5122

# Введение

Достаточно высокая яркость источников синхротронного излучения (СИ) 3-го поколения дала исследователям возможность использовать когерентность рентгеновского пучка для высокоразрешающей микроскопии. Среди развитых на таких источниках фазо-контрастных методов получения изображений особенно востребованной стала птихография [1], позволяющая получать изображения объектов с нанометровым разрешением [2], а также восстанавливать каустику субмикронных пучков [3, 4]. С появлением и вводом в строй значительно более ярких источников СИ 4-го поколения, таких как MAX-IV (Швеция), SIRIUS (Бразилия), ESRF-EBS (Франция) и APS-U (США), эксплуатирующие когерентность рентгеновские методы становятся все более актуальными и продуктивными. При этом возможность использования когерентных методов совместно с традиционными открывает широкие перспективы для исследований в различных областях науки, в частности в геологии, геохимии и материаловедении.

Исследование структуры и состава микровключений в кристаллических зернах минералов составляет большой класс геологических задач. Особый интерес представляют магнитные минералы, содержащие информацию о геомагнитном поле в период формирования породы, что может использоваться для восстановления динамики литосферных плит. При этом чем старше исследуемый минерал, тем сложнее его геологическая история и тем выше требования к пространственному разрешению при его картировании. Птихография в жестком рентгеновском диапазоне позволяет недеструктивно восстановить распределение электронной плотности и разрешить субмикронные включения, а знание а priori о химическом составе образца (например, полученное с помощью рентгенофлуоресцентного анализа, англ. X-ray Fluorescence – XRF) позволяет идентифицировать отдельные фазы [5].

В птихографии исследуемый протяженный образец освещают пучком когерентного или частично-когерентного излучения с малыми по сравнению с образцом поперечными размерами. Такой пучок может быть сформирован как коллимирующей апертурой (пинхолом), так и фокусирующей оптикой. Образец перемещают в плоскости, расположенной под некоторым углом к пучку (обычно 90° или 45°), таким образом, чтобы освещаемые области при различных положениях образца перекрывались, при этом для каждого положения регистрируется дифракционная картина в дальнем поле, т. е. в режиме дифракции Фраунгофера. Перекрытие зон освещения при сканировании обеспечивает переопределенность информации на тех областях, где образец облучался многократно, что позволяет при решении обратной задачи дифракции реконструировать функцию пропускания образца при а priori неизвестной функции освещения [6]. Теоретически достижимое таким образом пространственное разрешение ограничивается не числовой апертурой фокусирующей оптики, а длиной волны излучения, что делает птихографию особенно актуальной в жёстком рентгеновском диапазоне. На практике разрешение определяется эффективными размерами пиксела и динамическим диапазоном детектора, на данный момент достигнуто разрешение на уровне 4 нм [7]. Проникающая способность рентгеновского излучения позволяет совместить птихографию и компьютерную томографию [8] для недеструктивной трехмерной высокоразрешающей визуализации объектов. Птихотомография используется, в том числе, для исследования тонкой зеренно-пористой структуры горных пород и бетонов [9, 10].

Концентрация и распределение химических элементов являются крайне важными характеристиками литосферы и используются в геологических задачах для уточнения глубинных процессов рудообразования, при анализе перспективности месторождений полезных ископаемых, в микростратиграфических исследованиях, направленных на реконструкцию условий и среды образования осадочных пород. Особую роль в таких исследованиях играет метод рентгенофлуоресцентной микроскопии (µ-XRF). Вариант этого метода в конфокальной геометрии (конфокальный µ-XRF) [11] позволяет восстанавливать двух- и трехмерные карты распределения химических элементов с высоким пространственным разрешением. Использование оптики, собирающей флуоресцентное излучение на детектор, локализует область анализа до величин порядка микрометра, значительно повышая отношение сигнал/шум, что, в свою очередь, позволяет получать максимально детализированную информацию об элементном составе объектов исследования. Комбинация конфокального метода μ-XRF и XANES-спектроскопии (от англ. X-ray Absorption Near Edge Structure) даёт дополнительную информацию о локальной структуре и валентности элементов в точке исследования, решая задачу экспрессного восстановления минерального состава руд и осадков. Кроме того, неразрушающие методы XRF не имеют аналогов при исследовании сверхмалых космических объектов (космической пыли), флюидных, расплавных и других микровключений в минералы, а также при анализе археологических объектов.

μ-XRF микроскопия легко совмещается с традиционной сканирующей рентгеновской просвечивающей микроскопией (англ. Scanning Transmission X-ray Microscopy – STXM). Еще больше информации об образце позволяет получить комбинация μ-XRF с птихографией: в ходе птихографического сканирования флуоресцентный сигнал можно регистрировать параллельно с записью дифракционных картин. Такой мультимодальный подход дает возможность строить комплементарные карты плотности и распределения концентрации химических элементов [12].

Исследование поведения образцов различной природы *in situ* при воздействии высоких давлений представляет собой важное экспериментальное направление в таких областях знаний, как науки о

Земле и планетах, материаловедение, физика и химия твёрдого тела. Особенности наиболее распространённой в таких экспериментах техники алмазных наковален (малый объём образца и затруднённый физический доступ к нему) делают яркие пучки СИ практически безальтернативным «зондом» для получения разнообразной информации о структуре и свойствах вещества при высоких давлениях. Среди методов, особенно выигрывающих от очередного увеличения яркости СИ, следует остановиться на монокристальной дифракции. Кардинальный пересмотр возможностей этого метода в высокобарическом эксперименте произошёл в конце 2010-х гг. благодаря работам [13, 14], в которых было показано, что при использовании микронной фокусировки пучка СИ, объектом исследования методом монокристальной дифракции могут стать индивидуальные кристаллические домены поликристаллических образцов, сами по себе имеющие размер порядка микрометра. Именно в таком виде кристаллизуются продукты многих высокобарических фазовых переходов и реакций (например, при использовании лазерного нагрева образцов в алмазных наковальнях), кристаллические структуры которых не представлялось возможным идентифицировать ранее с использованием порошковой дифракции. Описанный подход, однако, предъявил к постановке эксперимента очень жёсткие требования, находящиеся на пределе возможностей источников СИ 3-го поколения: во-первых, микронную (а лучше субмикронную) фокусировку жёсткого рентгеновского излучения с энергией 30-40 кэВ, и, во-вторых, высокую прецизионность и воспроизводимость механических подвижек, которые должны не только вывести (суб)микронное зерно в фокус (суб)микронного же пучка СИ, но и удержать зерно в фокусе, одновременно непрерывно вращая его на угол порядка 70°. По причине столь жёстких требований нередко эксперименты с использованием описанной методики приходилось переносить со специализированных станций СИ на станции типа «нанофокус» (например, [14]).

Переход к машинам нового поколения приводит как к существенному увеличению доли когерентного потока фотонов, так и к росту тепловых нагрузок, что означает ужесточение требований на рентгенооптические элементы. В настоящей работе представлена концепция ондуляторной станции 1-1 «Микрофокус» строящегося источника СИ 4-го поколения ЦКП «СКИФ» [15] с описанием режимов работы оптики и сценариев экспериментов. Станция «Микрофокус» позволит реализовать методы конфокальной флуоресцентной микроскопии, спектро-микроскипи µ-XANES, монокристальной микродифракции, просвечивающей сканирующей микроскопии и птихографии (в том числе в комбинации с µ-XRF) и, таким образом, станет первой в своем роде установкой в России, сочетающей некогерентные и когерентные методы в жестком рентгеновском диапазоне.

#### Оптическая схема и оптические режимы

Состав и размещение оборудования Станции «Микрофокус» ЦКП «СКИФ» показаны на рис 1. Устройством генерации излучения является короткопериодный сверхпроводящий ондулятор с энергией фундаментальной гармоники  $E_{ph[1]}$ =2,06 кэВ [16]. Во фронтенде станции фиксированными масками осуществляется первичная коллимация ондуляторного излучения (ОИ), регулируемыми масками задаётся угловая апертура 75×75 мкрад<sup>2</sup>, первичная фильтрация производится алмазным фильтром суммарной толщиной 800 мкм.

Монохроматизация ОИ осуществляется последовательно с помощью двухзеркального многослойного монохроматора (ДЗМ) и прорезного кристалла-монохроматора (ПМ), отклоняющих пучки излучения в горизонтальной и вертикальной плоскостях соответственно. ДЗМ, обеспечивающий первичную монохроматизацию с полосой пропускания  $\Delta E/E \sim 10^{-2}$  [17] и снятие тепловых нагрузок с последующей оптики, располагается в оптическом хатче станции на расстоянии 55 м от центра ондулятора. При изменении рабочей энергии, т. е. при изменении угла наклона зеркал, второе зеркало ДЗМ перемещается вдоль оптической оси так, чтобы оффсет (поперечный сдвиг) пучка сохранялся постоянным. Наличие оффсета позволяет отделить от ОИ жёсткие гамма-кванты, возникающие из-за рассеяния электронов на остаточном газе в накопителе, и поглотить их в ловушке тормозного излучения. По этой причине, а также с целью термостабилизации ДЗМ должен постоянно находиться под пучком ОИ. На энергиях выше ~20 кэВ при малых скользящих углах существенным становится пропускание низких гармоник ОИ вследствие эффекта полного внешнего отражения (ПВО) зеркал ДЗМ (спектры ОИ и диаграммы Дюмонда ДЗМ в разделе «Источник и оптические элементы. Моделирование»). Для подавления этих паразитных гармоник используется 100, 200 и 300 мкм пластины SiC блока охлаждаемых фильтров. Дополнительная монохроматизация ОИ при необходимости осуществляется с помощью ПМ на основе кристалла Si(111) с  $\Delta E/E \sim 10^{-4}$ , находящегося на расстоянии 59 м от источника. Совместное использование ДЗМ и ПМ обеспечивает эффективное взаимное подавление паразитных кратных гармоник монохроматоров [18]. Для работы обоих устройств достаточно водяного охлаждения, что существенно упрощает всю конструкцию [19].



**Рис. 1.** Состав и размещение оборудования Станции 1-1 «Микрофокус» ЦКП «СКИФ» (указаны расстояния от центра ондулятора в мм; для ДЗМ, КБ и ПМ указаны положения центров первых зеркал и первой ламели кристалла соответственно)

**Fig. 1.** Equipment composition and arrangement at the 1-1 «Microfocus» beamline of SRF «SKIF» (distances from the center of the undulator in mm are indicated; for the DMM, KB and channel-cut monochromator, the positions of the centers of the first mirrors and the first lamella of the crystal are indicated, respectively)

Фокусировка ОИ выполняется парой зеркал Киркпатрика–Баеза (КБ), при этом центры вертикально и горизонтально фокусирующих зеркал располагаются на расстояниях 64,492 и 64,697 м, или двумя составными преломляющими линзами (СПЛ-1 на 27,1 м и СПЛ-2 на 62,3 м).

Ввод фокусирующих зеркал или линз [20], а также охлаждаемых и неохлаждаемых щелей позволяет реализовать три основных (рис. 2) и два дополнительных (раздел «Перспективы развития») режима работы оптики.

 Режим микрозонда со вторичным источником (рис. 2, а).

Режим предназначен для конфокального µ-XRF и STXM. Дополнительная информация о локальной структуре образцов может быть получена методом µ-XANES при введённом в пучок ПМ. Набором СПЛ-1 на диафрагме на 47 м (охлаждаемые щели) формируется вторичный источник, причем его размеры и форма могут быть настроены пользователем. Финальная фокусировка осуществляется набором скрещенных полимерных планарных линз (СПЛ-2). Размер пятна излучения на образце ~5 мкм. Применение диафрагмы в промежуточном фокусе пучка ОИ обеспечивает стабильность финального фокуса во времени. Кроме того, эта диафрагма ввиду хроматизма преломляющих линз подавляет паразитные высшие гармоники ОИ при работе на «розовом» пучке, т. е. без ПМ. Непосредственно перед образцом на 65 м располагается вторая диафрагма. Вблизи образца под прямым углом к пучку ОИ располагается энергодисперсионный детектор, регистрирующий флуоресцентный сигнал, ионизационные камеры до и после образца (устанавливается при необходимости) используются для записи и нормировки интегральной интенсивности прошедшего пучка при текущем положении образца. В режиме микрозонда двумерные и трехмерные комплементарные карты распределения концентраций химических элементов и плотности образца могут строиться одновременно. В ходе каждого сканирования дополнительно можно получать поточечные XANES-спектры.

 Режим микрозонда без вторичного источника (рис. 2, б).

Данный режим аналогичен предыдущему за исключением того, что набор СПЛ-1 выведен из пучка, охлаждаемые щели на 47 м разведены, а для фокусировки используется только СПЛ-2. Благодаря более длинному плечу «источник–линза» размер пятна на образце уменьшается до ~1 мкм. Заметим, что этот режим лишен указанных выше преимуществ режима со вторичным источником, он также уступает ему в потоке фотонов на образце. С целью предотвращения преждевременной деградации СПЛ-2 под воздействием ионизирующего излучения в этом режиме предпочтительно использовать ПМ (в комбинации с ДЗМ).

• Режим нанозонда (рис. 2, в).

Режим предназначен для монокристальной дифракции в алмазных наковальнях и для птихографии, в том числе в комбинации с µ-XRF. Фокусировка излучения на образце производится зеркалами КБ, размер фокусного пятна ~100 нм. В экспериментах по птихографии неохлаждаемые щели перед КБ выделяют площадь когерентности ~100×100 мкм<sup>2</sup>. Регистрация распределения интенсивности в режиме дифракции Фраунгофера осуществляется пиксельным детектором. Так же, как и в случае микрозонда, флуоресцентный сигнал регистрируется энергодисперсионным детектором, расположенным вблизи образца.



- **Рис. 2.** Основные режимы работы оптики: а, б) микрозонд с размером фокусного пятна 5 мкм и 1 мкм соответственно; в) нанозонд
- *Fig. 2.* Main modes of optics operation: a, 6) microprobe with a focal spot size of 5 and 1 μm, respectively; в) nanoprobe

### Сценарии экспериментов

Эксперимент с использованием метода птихографии предполагает следующие шаги:

- Измерение функции освещения. Восстановление амплитуды и фазы освещающей волны (нанозонда) осуществляется однократно путем птихографического измерения заранее известного калибровочного образца, например, «звезды Сименса».
- Микрокартирование неизвестного образца по сигналу поглощения. По сетке с шагом ~1–10 мкм в каждой точке измеряется интенсивность прошедшей сквозь образец волны путем интегрирования сигнала матричного детектора.
- Выявление «областей интереса» (определение границ исследуемого образца).
- *Птихографическое сканирование*. По тонкой сетке для всех перекрывающихся положений нанозонда в пределах выделенной на предыдущем шаге области регистрируются дифракционные картины в зоне дифракции Фраунгофера. Перекрытие двух соседних положений образца выбирается эмпирически и может достигать 50–60 % площади нанозонда.
- Восстановление функции пропускания образца. Для решения обратной задачи дифракции применяется итеративный алгоритм [21], при этом может использоваться априорная информация о функции освещения. В качестве первичной оценки амплитуды прошедшей через образец волны используется полученная ранее относительно грубая карта по сигналу поглощения.

Доступны следующие варианты режимов сканирования:

- Классический пошаговый, "start-stop-measure", скан, в том числе как на традиционной прямоугольной растровой сетке координат (x, y), так и на радиальной (ρ (радиус-вектор), φ (азимутальный угол)) – так называемый спиральный скан, фактически означающий переход к полярной системе координат для функции пропускания образца.
- Непрерывный, "fly", скан, когда образец без остановок движется с определённой скоростью вдоль как минимум одной координаты и детектор запускается в заранее заданные моменты времени и через определенные интервалы. Подобный подход позволяет существенно снижать полное время сканирования и тем самым значительно повышать общую эффективность всего процесса набора данных.

Типовой эксперимент с использованием методики **монокристальной микродифракции** при высоком давлении предполагает следующие шаги:

• Центрирование образца в ячейке с алмазными наковальнями на оси гониометра. Операция

осуществляется с помощью серии сканирований на пропускание пучка при различных углах поворота гониометра.

- Дифракционное микрокартирование образца. По сетке с шагом ~1 мкм в каждой точке снимается дифракционное изображение.
- Выявление «областей интереса», т. е. точек образца, дифракция в которых имеет характер монокристальной и предположительно соответствует интересующей пользователя фазе.
- Монокристальная съёмка в выделенных на предыдущем шаге точках. Выбранная точка снова перемещается в фокус пучка и при непрерывном вращении гониометра в диапазоне ±30–40° детектором регистрируется серия из 120–180 дифракционных изображений.

Помимо описанной схемы методика монокристальной дифракции может применяться и в классической схеме, т. е. для кристаллов размером в несколько десятков микрометров.

Исследования методом конфокального µ-XRF выполняется следующим образом:

- Определение границ исследуемого образца (или области исследования в матрице). Операция осуществляется с помощью оптического микроскопа, ось которого проходит сквозь конфокальный объём. При этом спектр флуоресценции регистрируется энергодисперсионным детектором.
- предварительное µ-XRF картирование образца. По одно-, двух- или трёхкоординатной сетке с выбранным шагом (~1–10 мкм) в каждой точке регистрируется спектр флуоресценции.
- Выявление «областей интереса», т. е. точек или малых областей образца, содержащих искомые химические элементы. Далее по одно-, двухили трёхкоординатной сетке с выбранным шагом (~100 нм – 1 мкм) в каждой точке регистрируется спектр флуоресценции.

Регистрация интенсивности прошедшего через образец излучения позволяет комбинировать методы конфокального µ-XRF и STXM. Совместные исследования методами конфокального µ-XRF и µ-XANES выполняются согласно вышеописанному сценарию для конфокального µ-XRF, при этом в каждой точке, представляющей интерес для пользователя, регистрируется околокраевая структура спектра поглощения. Реализуемые на станции сценарии экспериментов позволяют также комбинировать конфокальный µ-XRF и птихографию.

#### Источник и оптические элементы. Моделирование

Для оценок потока фотонов, размеров и спектральной ширины пучка ОИ, а также тепловых нагрузок на оптические элементы станции «Микрофокус» использованы следующие параметры накопительного кольца ЦКП «СКИФ»: энергия электронов 3 ГэВ, ток пучка 400 мА, натуральный эмиттанс 75 пм рад, коэффициент связи 0,1, горизонтальная и вертикальная бета-функции в центре прямолинейного промежутка 15,6 и 2,4 м соответственно.

• Ондулятор

На станции «Микрофокус» для генерации жесткого рентгеновского излучения используется 128периодный сверхпроводящий ондулятор с периодом  $\lambda_u$ =15,6 мм, максимальным магнитным полем на оси B=1,25 Тл и соответствующей энергией фундаментальной гармоники  $E_{ph[1]}$ =2,06 кэВ [16]. Устройство разработано в Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН. Изображение источника и диаграммы направленности излучения приведены на рис. 3, *a*, *б*. Здесь и далее в расчетах рассматриваются крайние значения рабочего диапазона энергий фотонов: 10,3 кэВ (5-я гармоника, индекс <sub>[5]</sub>) и 30,9 кэВ (15-я гармоника индекс <sub>[15]</sub>). Размеры источника:  $(\sigma_x \times \sigma_y)_{[5]} \approx (\sigma_x \times \sigma_y)_{[15]} = 32,9 \times 5,9$  мкм<sup>2</sup>. Расходимость излучения на энергии резонанса:  $(\sigma_x \times \sigma_y)_{[5]} = 9,4 \times 11$ мкрад<sup>2</sup>,  $(\sigma_x \times \sigma_y)_{[15]} = 5 \times 10$  мкрад<sup>2</sup>. Масками во фронтенде задаётся угловая апертура 75×75 мкрад<sup>2</sup>, спектр прошедшего через эту апертуру ОИ приведен на рис. 3, *в*. Полная мощность генерируемого излучения составляет 7,1 кВт, мощность ОИ после фронтенда с учетом стационарных алмазных фильтров – 0,15 кВт.



**Рис. 3.** Ондулятор станции «Микрофокус»: расчетные изображения источника (а) и диаграммы направленности (б) ОИ для 5-й и 15-й гармоник; спектры ОИ после фронтенда, фильтров и ДЗМ (в). Белым квадратом в (б) обозначена апертура фронтенда. Расчет выполнен с помощью Spectra [22] и XOPPY [23]

Fig. 3. Undulator of the 1-1 «Microfocus» beamline: calculated images of the source (a) and the directivity patterns (6) of the SR for the 5th and 15th harmonics; spectra of the SR after the frontend, filters and DMM (β). The white square in (6) indicates the frontend aperture. Calculated using Spectra [22] and XOPPY [23]



**Рис. 4.** Плотность мощности поглощаемого фильтрами излучения: а) объемная на оси ондулятора; б) проинтегрированная по толщине. Расчет выполнен с помощью Spectra

Fig. 4. Power density of radiation absorbed by filters: a) on-axis 3D density; 6) integrated over the thickness 2D density. Calculated using Spectra

#### • Фильтры

Во фронтенде станции находятся два алмазных водоохлаждаемых вакуумных окна толщиной по 400 мкм, выполняющих роль первичных фильтров. Наиболее теплонагруженный первый алмазный фильтр располагается после фиксированной маски на расстоянии 18,6 м от центра ондулятора, соответствующий размер облучаемой области составляет 3,74×3,74 мм<sup>2</sup>. Поглощаемая первым фильтром мощность – 782 Вт, пиковая плотность мощности – 2,3 кВт/мм<sup>3</sup>. При необходимости дополнительная фильтрация осуществляется вводом 100, 200 и 300 мкм пластин SiC блока охлаждаемых водой фильтров на 26 м, размер облучаемой области 1,95×1,95 мм<sup>2</sup>. Одна введенная в пучок 100 мкм пластина SiC поглощает 28 Вт, все три пластины суммарной толщиной 600 мкм - 80 Вт. Зависимость объемной плотности мощности поглощаемого фильтрами излучения на оси ондулятора от глубины вещества приведена на рис. 4, а, двумерная (проинтегрированная по толщине 400 мкм для алмаза и 100 мкм для SiC) плотность мощности - на рис. 4, б, спектры ОИ с учетом фильтрации – на рис. 3, в.

Дальнейшие расчеты приводятся с учетом алмазного фильтра 800 мкм при выведенном из пучка фильтре SiC, если не указано иное.

• СПЛ-1

Первый набор преломляющих линз с изменяемым фокусным расстоянием, т. н. охлаждаемый трансфокатор, расположен в 27,1 м от центра ондулятора и предназначен для формирования вторичного источника на 47 м. Набор состоит из охлаждаемых параболоидных двояковогнутых бериллиевых линз с радиусом кривизны при вершине R и геометрической апертурой  $A_{geom}$ : 61 линза с R=0,5 мм и  $A_{geom}=1,4$  мм, 10 линз с R=5 мм и  $A_{geom}=4,4$  мм. Минимальная толщина линз (перетяжка между вершинами параболоидов вращения) составляет 0,03 мм, максимальная толщина – 1 мм [24]. Пользователь может вводить и выводить из пучка ОИ каждую отдельную линзу, тем самым дискретно компенсируя изменение фокусного расстояния при перестройке рабочей энергии. Наличие «слабых» линз с R=5 мм необходимо для уменьшения шага фокусного расстояния при работе на энергиях до ~15 кэВ. Выбор бериллия в качестве материала линз обусловлен высоким отношением  $\delta/\beta$ . Стоит отметить, что изготавливаемые по технологии порошковой металлургии бериллиевые линзы обладают зеренно-пористой структурой, что приводит к малоугловому рентгеновскому рассеянию [25] и, при работе с частично-когерентным ОИ, – к паразитной интерференции [26]. Эти нежелательные эффекты, вызывающие ухудшение отношения сигнал/шум, минимизируются в схеме со вторичным источником.

Зависимость объемной плотности мощности поглощаемого излучения на оси ондулятора от глубины слоя бериллия приведена на рис. 5, *а*. Первой линзой (R=0,5 мм) трансфокатора поглощается 1,9 Вт, соответствующая карта двумерной плотности мощности приведена на рис. 5, *б*.

#### • Монохроматоры

Первичная монохроматизация ОИ осуществляется двухзеркальным многослойным монохроматором с фиксированным оффсетом. Устройство разработано в Институте физики микроструктур РАН (ИФМ РАН) [17]. Для работы ДЗМ в энергетическом диапазоне 10–31 кэВ используются три полосы многослойных покрытий: Мо/В<sub>4</sub>С (до ~18 кэВ,  $\Delta E/E\approx 1,6\cdot 10^{-2}$ ), W/B<sub>4</sub>C (после ~18 кэВ,  $\Delta E/E\approx 10^{-2}$ ) и Cr/Be (после ~18 кэВ,  $\Delta E/E\approx 0,4\cdot 10^{-2}$ ) [28–30]. Диапазон рабочих углов скольжения зеркал ДЗМ 0,5–1°. Параметры многослойных структур приведены в табл. 1, соответствующие диаграммы Дюмонда ДЗМ – на рис. 6, *a*, пример спектра ОИ после ДЗМ – на рис. 3, *в*.



Рис. 5. Плотность мощности поглощаемого бериллием излучения: а) объемная на оси ондулятора; б) проинтегрированная по толщине первой линзы. Расчет выполнен с помощью Spectra и XRT [27]
 Fig. 5. Power density of radiation absorbed by beryllium: a) on-axis 3D density; б) integrated over the thickness of the first

lens 2D density. Calculated using Spectra and XRT [27]

Таблица 1.	Параметры многослойных покрытий
Table 1.	Multilayers parameters

Покрытие Coating	Число слоев Number of layers	Период, нм Period, nm	Отношение толщины «high-Z» подслоя к периоду «High-Z» sublayer thickness portion of layer	Среднеквадратичная шероховатость, нм RMS-roughness, nm
Mo/B <sub>4</sub> C	150	3,615	0,4	σ <sub>Mo</sub> =0,2 σ <sub>B4C</sub> =0,3
W/B <sub>4</sub> C	300	2,1	0,38	$\sigma_{W}$ =0,25, $\sigma_{B4C}$ =0,49
Cr/Be	300	2	0,5	σ=0,43

Подложки многослойных зеркал выполнены из монокристалла Si с проточками типа «smart-cut» [17, 19], служащими для уменьшения теплоиндуцированных деформаций. Применяется водяное охлаждение зеркал: через медные трубки, контактирующие с боковыми поверхностями подложки и составляющие несвязанные контуры охлаждения, пропускаются противонаправленные ламинарные потоки воды (рис. 6, б). Для первого зеркала в наиболее теплонагруженном случае (при *E*<sub>ph[5]</sub>=10,3 кэВ) в режимах без вторичного источника (поглощаемая мощность *P*<sub>tot</sub>=110 Вт, рис. 6, в) и с ним (*P*<sub>tot</sub>=0,8 Вт, рис. 6, г) приведены карты тепловых нагрузок, стационарные распределения температур и поля деформаций. Соответствующие полные разбросы углов наклона рабочей поверхности деформированного зеркала вдоль пучка  $\Delta_{\parallel}$  и поперек пучка  $\Delta_{\perp}$ : в режимах без вторичного источника  $\Delta_{\parallel} = 1$  мкрад,  $\Delta_{\perp} = 11$  мкрад; в режимах со вторичным источником  $\Delta_{\parallel} = 0,5$  мкрад,  $\Delta_{\perp} = 0,8$  мкрад.

Для дополнительной монохроматизации в пучок ОИ вводится прорезной кристалл-монохроматор Si(111) с водяным охлаждением. Устройство разработано в Новосибирском государственном техническом университете (НГТУ). Диаграммы Дюмонда ПМ приведены на рис. 7, a (пример при  $E_{ph[5]}$ =10,3 кэВ и  $E_{ph[15]}$ = 30,9 кэВ). В наиболее теплонагруженном случае (при  $E_{ph[5]}$ =10,3 кэВ) в режимах без вторичного источника (поглощаемая мощность  $P_{tot}$ =7,21 Вт, рис. 7,  $\delta$ ) и с ним ( $P_{tot}$ =0,98 Вт, введен дополнительный фильтр SiC 200 мкм, рис. 7,  $\epsilon$ ) приведены карты тепловых нагрузок и стационарные распределения температур первой ламели кристалла, а также поля деформаций всего кристалла. Соответствующие полные разбросы углов наклона рабочей поверхности первой ламели деформированного кристалла вдоль пучка  $\Delta_{\parallel}$  и поперек пучка  $\Delta_{\perp}$ : в режимах без вторичного источника  $\Delta_{\parallel} = 6,2$ мкрад,  $\Delta_{\perp} = 8,5$ мкрад; в режимах со вторичным источником  $\Delta_{\parallel} = 4,2$ мкрад,  $\Delta_{\perp} = 5,2$ мкрад.

Для ДЗМ и ПМ расчеты тепловых нагрузок выполнены с помощью XRT, расчеты распределений температур и деформаций – с помощью модулей Fluent и StaticStructural ANSYS [31] и Simulation SOLIDWORKS [32]. Расчеты свидетельствуют о возможности применения водяного охлаждения: установившиеся теплоиндуцированные угловые деформации ДЗМ вдоль пучка сопоставимы с угловым размером источника (2,355×32,9 мкм/59 м ≈1,3 мкрад), а угловые деформации ПМ лежат в пределах ширины Дарвина  $\Delta \theta_D = 26,1$  мкрад (для Si(111) при  $E_{ph}=10,3$  кэВ).



- Рис. 6. Двухзеркальный многослойный монохроматор: а) диаграммы ДюМонда (R коэффициент отражения); б) геометрия подложек и трубок охлаждения; в, г) плотность мощности поглощаемого ОИ, стационарное распределение температур и поле деформаций для первого зеркала в режимах без вторичного источника и с ним соответственно. Указаны локальные координаты
- **Fig. 6.** Double-mirror multilayer monochromator: a) DuMond diagrams (R reflectivity); δ) geometry of substrates and cooling tubes; *θ*, *ε*) power density of the absorbed SR, steady-state temperature distribution and deformation field for the first mirror in modes without and with a secondary source, respectively. Local coordinates are indicated

#### • Щели

На станции «Микрофокус» используются охлаждаемые щели на расстоянии 47 м (устройство разработано в Конструкторско-технологическом институте научного приборостроения СО РАН) для формирования вторичного источника, набор неохлаждаемых щелей после ДЗМ и ПМ (устройства разработаны в НГТУ). На расстоянии 65 м, непосредственно перед образцом, должен располагаться набор пинхолов и охранные щели (составляющие диафрагму) для пространственной фильтрации пучка ОИ. Максимальные тепловые нагрузки на охлаждаемые и охранные щели приведены в табл. 2. Расчет выполнен в XRT в предположении, что пучок ОИ поглощается щелями полностью.



- Прорезной кристалл-монохроматор: a) диаграммы ДюМонда (R коэффициент отражения кристаллов, Puc. 7. серая вертикальная полоса – разброс углов пучка ОИ); б, в) плотность мощности поглощаемого ОИ, стационарное распределение температур и поле деформаций для режимов без вторичного источника и с ним соответственно. Указаны локальные координаты
- Fig. 7. Channel-cut monochromator: a) DuMond diagrams (R – crystal reflectivity, gray vertical strip indicates SR beam angles spread); б, в) absorbed radiation power density, steady-state temperature distribution and deformation field for modes without and with a secondary source, respectively. Local coordinates are indicated

Table 2.	Peak therma	l loads on cooled and protective slits	
		Muunooour oo propuuu uu	Микрозонд без вторичного ис

Таблица 2.	Максимальные тепловые нагрузки на охлаждаемые и охранные щели
Table 2	Deals thermal leads on social and protective slits

Элемент/режим работы Element/operation mode	Микрозонд со вторичным источником Microprobe with a secondary source	Микрозонд без вторичного источника (введен ПМ) Microprobe without a secondary source (channel-cut is inserted)	Нанозонд Nanoprobe
Щели на 47 м	<i>P</i> <sub>tot</sub> =46,5;		
Slits at 47 m	$\rho_{max}=5,2$	-	_
Щели на 65 м	$P_{tot} = 0,55;$	<i>P</i> <sub>tot</sub> =0,0016;	$P_{tot} = 0,22$
Slits at 65 m	$\rho_{max}=20$	$ ho_{max}$ =0,78	$\rho_{max}$ =4300

Р<sub>tot</sub> – полная мощность, Bm/total power, W, ρ<sub>max</sub> – пиковая плотность мощности поглощаемого излучения, мВт/мкм<sup>2</sup>/peak power density of absorbed radiation, mW/µm<sup>2</sup>.

### • Оптика финального фокуса

В режиме микрозонда для фокусировки ОИ на образец используются расположенные на 62,3 м наборы двояковогнутых скрещенных планарных полимерных линз (СПЛ-2). Форма поверхности линз – параболический цилиндр с радиусом при вершине R=0,2 мм и геометрической апертурой A<sub>geom</sub>=0,88 мм. Минимальная толщина линз (перетяжка между вершинами парабол) составляет 0,03 мм, максимальная толщина – 1 мм. В режиме микрозонда со вторичным источником плечи фокусирующей системы составляют 15,3 м к 3,6 м, без вторичного источника - 62,3 м к 3,6 м. Наборы линз изготавливаются по LIGA-технологии из SU-8 [33] индивидуально для каждого режима работы оптики и используемой гармоники ОИ. Пользователь может переключаться между наборами с разным числом линз для компенсации изменения фокусного расстояния при перестройке рабочей энергии. Тонкая настройка положения фокуса осуществляется продольным перемещением СПЛ-2.

Описанные преломляющие полимерные линзы из SU-8 вследствие их рентгеноаморфности [34] лишены недостатков бериллиевых линз - они не вызывают паразитную интерференцию и интенсивное малоугловое рассеяние в рабочем диапазоне энергий. Тем не менее полимерные линзы подвержены деградации под воздействием ионизирующего излучения, а потому могут долговременно использоваться только в режимах с невысокой радиационной нагрузкой, то есть в режимах с ПМ и на «розовом» пучке со вторичным источником. На рис. 8 для режима микрозонда со вторичным источником при выведенном из пучка ПМ приведена карта двумерной плотности мощности ОИ, поглощаемого первым элементом составной линзы СПЛ-2. Всего первым элементом поглощается 0,31 Вт.



**Рис. 8.** Плотность мощности излучения, поглощаемого первым элементом составной линзы из SU-8. Расчет выполнен с помощью XRT

*Fig. 8.* Power density of radiation absorbed by the first element of a compound lens made of SU-8. Calculated using XRT

В режиме нанозонда для субмикронной фокусировки по двум координатам применяется пара изогнутых зеркал скользящего падения - система Киркпатрика-Баеза с зеркалами полного внешнего отражения. Поверхности зеркал – вогнутые эллиптические цилиндры с радиусами кривизны в центрах  $R_{1,2}$ , первое зеркало с  $R_1 \approx 420$  м фокусирует излучение по вертикали с плечами 64,492 м к 0,555 м, второе зеркало с  $R_2 \approx 266$  м – по горизонтали с плечами 64,697 м к 0,350 м. Длины зеркал – 200 мм, покрытие - Pt, скользящий угол падения пучка – 0,15°, среднеквадратичная шероховатость – 0,3 нм. На рис. 9 приведена зависимость коэффициента отражения зеркал R от энергии падающего излучения при фиксированном скользящем угле. Система зеркал КБ разработана в ИФМ РАН (ранее был изготовлен и протестирован прототип с более короткими зеркалами [35]).



- **Рис. 9.** Отражательная способность зеркал Киркпатрика-Баеза с Pt покрытием при скользящем угле 0,15°
- Fig. 9. Reflectivity of Pt-coated Kirkpatrick–Baez mirrors at a grazing angle of 0,15°

#### • Параметры излучения на образце

Параметры излучения на образце, а именно: размеры  $\sigma_x \times \sigma_y$ , поток фотонов и относительная ширина спектральной полосы на полувысоте  $\Delta E/E$ , приведены на рис. 10 для всех режимов работы оптики при  $E_{ph}$ =10,3 кэВ (слева) и  $E_{ph}$ =30,9 кэВ (справа).

Предполагается, что для проведения исследований методом птихографии используется режим нанозонда при минимальной рабочей энергии фотонов, т. е. при  $E_{ph}$ =10,3 кэВ. При этом для выделения когерентной части пучка ОИ перед зеркалами КБ на расстоянии 59,9 м от источника щелями задается апертура  $l_x^{coh} \times l_y^{coh} = 64 \times 355$ мкм<sup>2</sup>, где  $l_{x,y}^{coh} = \frac{\lambda R}{2\sqrt{\pi}\sigma_{x,y}}$  – поперечная длина когерентности

гауссова источника с размерами  $\sigma_{x,y}$  на расстоянии *R* для длины волны λ. Отметим, что эффективная апертура зеркал КБ равна поперечной длине когерентности падающего пучка, поэтому рассматриваемый случай находится на границе области применимости геометрической оптики. В действительности ожидается дифракционное уширение: распределение интенсивности в фокусе будет соответствовать дифракции на прямоугольной щели с размерами центрального пятна по расстоянию между первыми минимумами ~1240×350 нм<sup>2</sup>.

Эксперименты по микродифракции проводятся в режиме нанозонда при энергии *E*<sub>ph</sub>=30,9 кэВ с открытой апертурой на 59,9 м. В этом случае длина когерентности значительно меньше апертуры зеркал КБ 520 мкм, когерентная доля значительно меньше 100 %, в связи с чем размер фокального пятна может быть оценен подходами геометрической оптики, а потому применима трассировка лучей.

#### Система окружения образца

системы детектирования.

Система окружения образца (СОО) представлена на рис. 11. Система включает в себя длинный оптический стол, состоящий из двух гранитных плит длиной 3,3 м и шириной 0,9 м, на которых расположены:

- блок конфокального рентгеновского микроскопа, • который служит для высокоточного позиционирования образца по трем линейным и трем угловым координатам в режимах микрозонда и нанозонда для экспериментальных исследований методом конфокального µ-XRF (в т. ч. в комбинации с µ-XANES, STXM или птихографией);
- блок высокого давления, который служит для • вращения образца вокруг вертикальной оси и позиционирования по трем линейным координатам, а также его нагрева и сжатия в режиме нанозонда для экспериментальных исследований методом микродифракции;



•



- Рис. 10. Оценка параметров излучения на образце при Ерh=10,3 кэВ слева (покрытие ДЗМ Мо/В4С) и Ерh=30,9 кэВ справа (покрытие ДЗМ Cr/Be): а) в режиме микрозонда со вторичным источником; б) в режиме микрозонда без вторичного источника; в) в режиме нанозонда. Указаны случаи, когда введен ПМ или дополнительный фильтр SiC. Расчет выполнен методом трассировки лучей с помощью XRT
- Fig. 10. Estimation of SR beam parameters on the sample at  $E_{ph}$ =10,3 keV on the left (Mo/B4C DMM coating) and  $E_{ph}$ =30,9 keV on the right (Cr/Be DMM coating): a) in the microprobe mode with a secondary source; б) in the microprobe mode without a secondary source,  $\beta$ in the nanoprobe mode. The cases where a channel-cut or an additional SiC filter is introduced are shown. The calculation was performed by ray tracing using XRT



Кроме того, в составе СОО имеется высокоразрешающий оптический микроскоп для наблюдения за образцом и контроля его положения при исследовании конфокальным µ-XRF, µ-XANES, STXM. На оптический стол также устанавливается оптика финального фокуса (система зеркал КБ и линзы СПЛ-2). Блоки конфокального рентгеновского микроскопа и высокого давления являются сменными, т. е. в процессе эксперимента используется только один из них, а второй выводится из пучка.



**Рис. 11.** Система окружения образца (СПЛ-2 на рисунке не указана)

Fig. 11. Sample environment (CRL-2 is not indicated)

#### Системы детектирования

• Система детектирования для монокристальной дифракции при высоком давлении

Поскольку в монокристальном дифракционном эксперименте при высоком давлении сбор данных происходит за одно «омега-сканирование» (т. е. вращение ячейки высокого давления с образцом вокруг вертикальной оси в заданном угловом диапазоне), угловая апертура детектора должна соответствовать условию  $\sin\theta_{min}/\lambda \ge 0,6$  (минимальное межплоскостное расстояние 0,83 Å), необходимому для качественной расшифровки и уточнения кристаллических структур. Таким образом, детектор должен полностью охватывать конус дифракции не менее  $\pm 28^{\circ}$ .

Количество пикселей детектора при этом определяется необходимым разрешением в обратном пространстве. Если в качестве последнего брать значение 0,02 Å<sup>-1</sup>, соответствующее максимальной периодичности кристаллической решётки в 50 Å и достаточное для работы с неорганическими соединениями и «малыми» органическими молекулами, угловой размер пикселя детектора не должен превышать 0,8 мрад, так что на дифракционных картинах центры соседних рефлексов будут разделены как минимум десятью пикселями. Сопоставляя это значение с приведённым выше требованием к угловой апертуре детектора, можно получить минимальный размер его матрицы, составляющий порядка 1200×1200 пикселей.

Для работы со сравнительно простыми структурами может использоваться дифракционный детектор с динамическим диапазоном порядка 16 бит, например, плоскопанельный или ССD, однако для проведения передовых исследований, связанных с анализом диффузного рассеяния, сверхструктурных и сателлитных рефлексов и т. п. понадобится низкофоновый фотон-счётный детектор типа НРАD, имеющий динамический диапазон порядка 20 бит и выше.

#### • Система детектирования для птихографии

В экспериментах по птихографии для выделения площади когерентности на расстоянии 59,9 м от источника устанавливают щели с апертурой  $64 \times 355$  мкм<sup>2</sup>, которые обеспечивают сходимость пучка в фокусе 0,194×0,69 мрад<sup>2</sup> с прямоугольным угловым распределением.

Пусть образец имеет особенность с характерным размером  $\delta_s$ , которой в дальнем поле соответствует угол дифракции λ/δ<sub>s</sub>. Согласно теореме Котельникова для восстановления особенности  $\delta_s$  детектор должен регистрировать дифракционную картину в диапазоне углов как минимум  $\pm \frac{\lambda}{2\delta_s} =$  $\frac{N\delta_d}{2R_d}$ , где N и  $\delta_d$  – число и размер пикселей детектора соответственно (по одной координате), R<sub>d</sub> – расстояние между образцом и детектором. Иначе говоря, в когерентной дифракционной микроскопии существует связь между потенциально достижимым разрешением и параметрами детектора:  $\delta_d = \frac{\lambda R_d}{N \delta_d}$ Описанная ранее схема позволит реконструировать изображение исследуемого объекта до разрешения на уровне 4-5 нм в случае использования детектора с матрицей ~600×600 пикселей, регистрирующего рассеянное излучение в конусе  $\pm 14$  мрад ( $\pm 0,8^{\circ}$ ). Учитывая, что размер пиксела подходящих детекторов составляет не менее 50-75 мкм, такой детектор должен быть помещён на расстоянии 1-2 м от образца. С учётом требований к динамическому диапазону и фону детектора для измерений требуется низкофоновый фотон-счетный детектор типа HPAD с динамическим диапазоном от 20 бит.

Стоит отметить, что необходимое число фотонов на пиксел детектора *n* быстро растёт по мере улучшения разрешения:  $n \propto 1/\delta_s^2$  [36]. Работа на «розовом» пучке, т. е. с применением только ДЗМ без ПМ, даст существенный выигрыш в потоке фотонов, тем не менее измерения на предельном пространственном разрешении потребуют значительных временных затрат. В случае такого типового объекта с высоким контрастом как медные контуры в кремниевом полупроводнике для получения трёхмерной реконструкции фрагмента размером  $10 \times 10 \times 10$  мкм с разрешением 5 нм понадобится не менее суток суммарной экспозиции. Последнее также накладывает ограничения на допустимые дрейфы положения пучка и воспроизводимость точной механики на временных промежутках длительностью в часы и десятки часов.

 Система детектирования для конфокального µ-XRF

Флуоресцентное излучение от образца собирается поликапиллярной линзой, устанавливаемой на одноэлементный энергодисперсионный детектор, работающий в счетном режиме (частота счета  $9 \times 10^5 \text{ c}^{-1}$ , энергетическое разрешение на уровне 140 эВ при 5,9 кэВ). При этом ось линзы располагается в горизонтальной плоскости перпендикулярно падающему пучку возбуждающего излучения.

• Система детектирования для STXM и XANES

Для регистрации опорного сигнала используется ионизационная камера, располагаемая перед образцом (рис. 1, б). Интенсивность прошедшего излучения может регистрироваться второй ионизационной камерой, вводимой после образца, или пиксельным детектором, работающем в режиме интегрирования сигнала. Также для XANESспектроскопии возможен вариант использования энергодисперсионного детектора для регистрации флуоресцентного сигнала от образца.

#### Перспективы развития

Кроме описанных режимов микро- и нано-зонда станция «Микрофокус» позволит также реализовать перспективные полнопольные когерентные техники получения изображений объекта: когерентный дифракционный имаджинг (англ. Coherent Diffraction Imaging – CDI) и фазо-контрастную микроскопию на основе спекл-интерферометрии (англ. Speckle-Based Phase Contrast X-ray Imaging – SB-PCXI).

Техника CDI в рентгеновском диапазоне [37] предшествовала птихографии и является для нее родственной. В CDI используется аналогичный ранее описанному подход к решению фазовой задачи, однако в отличие от птихографии ограничение здесь накладывается не на размер зонда, а на размер исследуемого объекта. В экспериментах по CDI изолированный тонкий (слабо меняющий фазу) образец освещают относительно широким когерентным пучком и регистрируют дифракционную картину в дальнем поле. Полученное распределение интенсивности содержит в себе информацию о больших векторах рассеяния, а восстанавливаемая из этого распределения карта образца потенциально может иметь разрешение, ограниченное длиной волны рентгеновского излучения. Иначе говоря, CDI позволяет картировать образец с высоким разрешением без фокусирующей оптики с высокой числовой апертурой, что, как и в случае с птихографией, особенно актуально в жёстком рентгеновском диапазоне. При этом для восстановления фазы также используется ранее упомянутый итеративный алгоритм, который в данном случае требует «избыточности» дискретизации дифракционной картины в Фурье-пространстве, а потому CDI подходит только для малых образцов - при фиксированном разрешении необходимый размер пиксела детектора обратно пропорционален размеру образца. Эксперименты по одночастичному когерентному имаджингу широко распространены в кристаллографии и являются рутинными для рентгеновских лазеров на свободных электронах [38], однако редко проводятся на источниках СИ 3-го поколения. Значительный рост когерентного потока фотонов при переходе на источники СИ 4-го поколения делает метод CDI более доступным и практичным, позволяя визуализировать процессы в динамике с высоким пространственным разрешением [39].

фазо-контрастная Рентгеновская спеклмикроскопия дает возможность визуализировать относительно большие слабо поглощающие образцы, практически не видимые в случае традиционного абсорбционного контраста. В SB-PCXI образец освещают широким полностью или частично когерентным пучком, причем перед образцом или после него вводят генератор спеклов - мембрану со случайными флуктуациями показателя преломления, например, лист абразивной бумаги [40], и записывают дифракционную картину в ближнем поле, т. е. в режиме дифракции Френеля. Референсное измерение проводят с выведенным из пучка образцом. Анализ вызванных образцом изменений дифракционной картины, а именно поперечных сдвигов, аттенюации и размытия спеклов, позволяет строить мультимодальные комплементарные карты по сигналам фазового контраста, абсорбционного контраста и малоуглового рассеяния соответственно [41]. Как и CDI, техника SB-PCXI не требует фокусирующей оптики с высокой числовой апертурой, разрешение определяется эффективными размерами пиксела детектора. Более того, SB-PCXI принципиально допускает искажения волнового фронта оптическими элементами. На современных источниках СИ SB-PCXI может использоваться для безлинзовой визуализации процессов в динамике, например деформации материалов, с выдержкой <1 мс [42], а также для метрологии рентгеновских зеркал и линз на рабочей длине волны [43, 44], в т. ч. с целью изготовления фазовых корректоров.

CDI и SB-PCXI могут использоваться как в «безлинзовом» режиме, так и в режиме со вторичным источником рис. 12, *а*, *б*, соответственно [20].

В первом случае вся фокусирующая оптика выводится из пучка ОИ, а во втором – бериллиевые линзы (СПЛ-1) фокусируют пучок ОИ на диафрагме, расположенной на расстоянии 47 м от источника (охлаждаемые щели), образуя вторичный источник. Диафрагмой перед образцом выделяется площадь когерентности. В режиме со вторичным источником поперечная длина когерентности на образце может быть настроена путем регулировки диафрагмы на 47 м. Размер пятна излучения на образце ~100–1000 мкм, разрешение ~10 нм для CDI и ~1 мкм для SB-PCXI.

#### «Дорожная карта»

В рамках первой очереди создания экспериментальных станций ЦКП «СКИФ» на станции «Микрофокус» будет введен в эксплуатацию основной канал, совпадающий с осью пучка СИ. Инженерная инфраструктура станции спроектирована и изготовлена с учетом ее развития и возможности ввода до трех дополнительных специализированных боковых каналов для рутинных дифракционных исследований на выделенных линиях, когда требуются исследования при больших выборках образцов и за ограниченное время.

Завершение изготовления оборудования станции запланировано на конец 2024 г. Начало монтажа ограничительных конструкций и инженерных систем ожидается в мае–июне 2025 г., завершение монтажа научного оборудования и запуск станции планируется на октябрь 2025 г. Рутинная эксплуатации станции, в том числе в интересах индустрии, ожидается в 2026 г.



**Puc. 12.** Режимы работы оптики для полнопольной микроскопии: а) безлинзовый; б) со вторичным источником **Fig. 12.** Modes of optics operation for full-field microscopy: a) lensless; б) with a secondary source

#### Заключение

Фокусирующая оптика экспериментальной станции 1-1 «Микрофокус» ЦКП «СКИФ» позволит варьировать размеры пучка ондуляторного излучения на образце в диапазоне от ~100 нм до ~10 мкм и достигать чрезвычайно высокой интенсивности. При этом также будут доступны режимы относительно широкого пучка ~100-1000 мкм (безлинзовый и со вторичным источником). Монохроматизация пучков будет осуществляется с помощью двухзеркального многослойного монохроматора и прорезного кристалла-монохроматора, обеспечивающих в диапазоне энергий 10-31 кэВ спектральную ширину излучения  $\Delta E/E$  на уровне  $\sim 10^{-3} - 10^{-2}$  и  $\sim 10^{-4}$  соответственно.

Предложенные решения позволят реализовать целый ряд экспериментальных методов: конфокальный µ-XRF, µ-XANES, µ-XRD, STXM и птихографию, а также их сочетания. Конфигурация станции открывает новые возможности в исследовании структуры вещества при высоком и сверхвысоком давлении, что является крайне актуальным для отечественных и зарубежных научных групп, активно работающих в области высокобарической минералогии и материаловедения. В частности, высокая востребованность станции ожидается для исследования высокобарических полигидридов - новых высокотемпературных сверхпроводников, поведения соединений, слагающих недра Земли и планет, возможностей управления с помощью давления свойствами функциональных материалов. Исследование химического состава веществ с высоким пространственным разрешением (двух- и трёхмерное картирование) позволит детально исследовать малые и сверхмалые объекты (пылинки, в том числе космические, зёрна минералов микронных размеров, включения различных типов) и получать новую информацию в микростратиграфических исследованиях, направленных на реконструкцию условий и среды образования осадочных пород, уточнять процессы рудообразования. Комбинация µ-XRF с XANES-спектроскопией и/или птихографией даёт исследователям новый инструмент для максимально полного изучения структуры, химического и минерального состава, а также валентности объекта в каждой его точке.

В результате станция 1-1 «Микрофокус» станет первой в своем роде установкой в России, позволяющей использовать когерентность рентгеновского излучения в жестком спектральном диапазоне и комбинировать когерентные экспериментальные методы с традиционными.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. High-resolution scanning x-ray diffraction microscopy / P. Thibault, M. Dierolf, A. Menzel, O. Bunk, C. David, F Pfeiffer. // Science. 2008. Vol. 321. № 5887. P. 379–382. DOI: https://doi.org/10.1126/science.1158573
- High-resolution non-destructive three-dimensional imaging of integrated circuits. / M. Holler, M. Guizar-Sicairos, E. Tsai, R. Dinapoli, E. Müller, O., Bunk J. Raabe, G. Aeppli // Nature. – 2017. – Vol. 543. – № 7645. – P. 402–406. DOI: https://doi.org/10.1038/nature21698
- Ptychographic characterization of the wavefield in the focus of reflective hard X-ray optics / M. Kewish, P. Thibault, M. Dierolf, O. Bunk, A. Menzel, J. Vila-Comamala, K. Jefimovs, F. Pfeiffer // Ultramicroscopy. – 2010. – Vol. 110. – № 4. – P. 325–329. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ultramic.2010.01.004
- Focusing hard x rays beyond the critical angle of total reflection by adiabatically focusing lenses / J. Patommel, S. Klare, R. Hoppe, S. Ritter, D. Samberg, F. Wittwer, A. Jahn, K. Richter, C. Wenzel, J.W Bartha., M. Scholz, F. Seiboth, U. Boesenberg, G. Falkenberg, C.G. Schroer // Appl. Phys. Lett. – 2017. – Vol. 110. – № 10. DOI: https://doi.org/10.1063/1.4977882
- Nanoscale imaging of Fe-rich inclusions in single-crystal zircon using X-ray ptycho-tomography / V.S.C. Kuppili, M. Ball, D. Batey, K. Dodds, S. Cipiccia, K Wanelik., R. Fu, C. Rau, R.J. Harrison // Sci. Rep. – 2024. – Vol. 14. – № 1. – Article number 5139. DOI: https://doi.org/10.1038/s41598-024-55846-4
- Fienup J.R. Reconstruction of an object from the modulus of its Fourier transform // Opt. Lett. 1978. Vol. 3. № 1. P. 27–29. DOI: https://doi.org/10.1364/OL.3.000027
- High-performance 4-nm-resolution X-ray tomography using burst ptychography / T. Aidukas, N.W. Phillips, A. Diaz, E. Poghosyan, E. Müller, A.F.J. Levi, G. Aeppli, M. Guizar-Sicairos, M. Holler // Nature. – 2024. – Vol. 632. – № 8023. – P. 81–88. DOI: https://doi.org/10.1038/s41586-024-07615-6
- Ptychographic X-ray computed tomography at the nanoscale / M. Dierolf, A. Menzel, P. Thibault, P. Schneider, C.M. Kewish, R. Wepf, O. Bunk, F. Pfeiffer // Nature. – 2010. – Vol. 467. – № 7314. – P. 436–439. DOI: https://doi.org/10.1038/nature09419
- Characterization of composition and structure of clay minerals in sandstone with ptychographic X-ray nanotomography / W. de Boever, A. Diaz, H. Derluyn, T. de Kock, J. van Stappen, J. Dewanckele, T. Bultreys, M. Boone, T. de Schryver, E.T.B. Skjønsfjell, M. Holler, D.W. Breiby, V. Cnudde // Appl. Clay Sci. – 2015. – Vol. 118. – P. 258–264. DOI: https://doi.org/10.1016/j.clay.2015.09.020
- Density mapping of hardened cement paste using ptychographic X-ray computed tomography / P. Trtik, A. Diaz, M. Guizar-Sicairos, A. Menzel, O. Bunk // Cem. Concr. Compos. – 2013. – Vol. 36. – P. 71–77. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.06.001
- 11. Дарьин Ф.А. Развитие метода конфокальной рентгеновской микроскопии для исследования микровключений в различные геологические матрицы: дисс. ... канд. техн. наук. Новосибирск, 2022. 141 с.
- X-ray ptychographic and fluorescence microscopy of frozen-hydrated cells using continuous scanning / J. Deng, D.J. Vine, S. Chen, Q. Jin, Y.S.G. Nashed, T. Peterka, S. Vogt, C. Jacobsen // Sci. Rep. – 2017. – Vol. 7. – № 1. – Article number 445. DOI: https://doi.org/10.1038/s41598-017-00569-y

- 13. Dubrovinskaia N., Dubrovinsky L. Crystallography taken to the extreme // Phys. Scr. 2018. Vol. 93. № 6. 062501 p. DOI: https://doi.org/10.1088/1402-4896/aabf25
- 14. Synthesis of FeN4 at 180 GPa and its crystal structure from a submicron-sized grain / M. Bykov, S. Khandarkhaeva, T. Fedotenko, P. Sedmak, N. Dubrovinskaya, L. Dubrovinsky // Acta Crystallogr. E. 2018. Vol. 74. № 10. P. 1392–1395. DOI: https://doi.org/10.1107/S2056989018012161
- 15. Lattice optimization of a fourth-generation synchrotron radiation light source in Novosibirsk / G. Baranov, A. Bogomyagkov, I. Morozov, S. Sinyatkin, E. Levichev // Phys. Rev. Accel. Beams. 2021. Vol. 24. № 12. 120704 p. DOI: https://doi.org/10.1103/PhysRevAccelBeams.24.120704
- 16. Superconducting wigglers and undulators for synchrotron radiation generation at the SKIF storage ring / V.A. Shkaruba, A.V. Bragin, A.A. Volkov, A.I. Erokhin, A.V Zorin., F.P. Kazantsev, P.V. Kanonik, N.A. Mezentsev, A.N. Safronov, A.A Sedov., O.A. Tarasenko, S.V. Khrushchev, V.M. Tsukanov // Phys. Part. Nucl. Lett. – 2023. – Vol. 20. –№ 4. – P. 904–908. DOI: https://doi.org/10.1134/S1547477123040623
- Optimization of the design and parameters of a double-mirror monochromator for the fourth-generation SKIF synchrotron light source / E.I. Glushkov, I.V. Malyshev, E.V. Petrakov, N.I. Chkhalo, Yu.V. Khomyakov, Ya.V. Rakshun, V.A. Chernov, I.P. Dolbnya // J. Surf. Invest. X-ray. 2023. Vol. 17. № Suppl 1. P. S233–S238. DOI: https://doi.org/10.1134/S1027451023070133
- Double multilayer monochromator to tailor bending magnet radiation spectrum / T. Bigault, E. Ziegler, C. Morawe, R. Hustache, J.Y. Massonnat, G. Rostaing // Proc. SPIE. – 2003. – Vol. 5195. – 12 p. DOI: https://doi.org/10.1117/12.515980
- A concept of "materials" diffraction and imaging beamline for SKIF: Siberian circular photon source / V.A. Chernov, I.A. Bataev, Ya.V. Rakshun, Yu.V. Khomyakov, M.V. Gorbachev, A.E. Trebushinin, N.I. Chkhalo, D.A. Krasnorutskiy, V.S. Naumkin, A.N. Sklyarov, N.A. Mezentsev, A.M. Korsunsky, I.P. Dolbnya // Rev. Sci. Instrum. – 2023. – Vol. 94. – № 1. DOI: https://doi.org/10.1063/5.0103481
- 20. Хомяков Ю.В., Ракшун Я.В., Чернов В.А. О корректном применении преломляющих линз для микроскопии с высоким пространственным разрешением на источниках синхротронного излучения четвертого поколения // ЖТФ. 2024. Т. 94. № 7. DOI: https://journals.ioffe.ru/articles/58351
- 21. Pfeiffer F. X-ray ptychography // Nat. Photonics. 2018. Vol. 12. № 1. P. 9–17. DOI: https://doi.org/10.1038/s41566-017-0072-5
- 22. Tanaka T. Major upgrade of the synchrotron radiation calculation code SPECTRA // J. Synchrotron Radiat. 2021. Vol. 28. № 4. P. 1267–1272. DOI: https://doi.org/10.1107/S1600577521004100
- Del Río M.S., Dejus R. XOP v2.4: recent developments of the x-ray optics software toolkit // Proc. SPIE. 2011. Vol. 8141. P. 368–372. DOI: https://doi.org/10.1117/12.893911
- 24. RXOPTICS. URL: https://www.rxoptics.de/ (дата обращения: 21.03.2025).
- 25. X-ray laminography and SAXS on beryllium grades and lenses and wavefront propagation through imperfect compound refractive lenses / T. Roth, L. Helfen, J. Hallmann, L. Samoylova, P. Kwaśniewski, B. Lengeler, A. Madsen // Proc. SPIE. – 2014. – Vol. 9207. – Article number 920702. DOI: https://doi.org/10.1117/12.2061127
- 26. Optics for coherent X-ray applications / M. Yabashi, K. Tono, H. Mimura, S. Matsuyama, K. Yamauchi, T. Tanaka, H. Tanaka, K. Tamasaku, H. Ohashi, S. Goto, T. Ishikawa // J. Synchrotron Radiat. 2014. Vol. 21. № 5. P. 976–985. DOI: https://doi.org/10.1107/S1600577514016415
- 27. Klementiev K., Chernikov R. Powerful scriptable ray tracing package xrt // Proc. SPIE. 2014. Vol. 9209. P. 60-75. DOI: https://doi.org/10.1117/12.2061400
- Investigation of structural and reflective characteristics of short-period Mo/B4C multilayer X-ray mirrors / R. Shaposhnikov, V. Polkovnikov, S. Garakhin, Y. Vainer, N. Chkhalo, R. Smertin, K. Durov, E. Glushkov, S. Yakunin, M. Borisov // J. Synchrotron Radiat. 2024. Vol. 31. № 2 P. 268–275. DOI: https://doi.org/10.1107/S1600577524000419
- 29. Ultra-short period X-ray mirrors: production and investigation / M.S. Bibishkin, N.I. Chkhalo, A.A. Fraerman, A.E. Pestov, K.A. Prokhorov, N.N. Salashchenko, Yu.A. Vainer // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. 2005. Vol. 543. № 1. P. 333–339. DOI: https://doi.org/10.1016/j.nima.2005.01.251
- 30. Intrinsic roughness and interfaces of Cr/Be multilayers / R. Pleshkov, N. Chkhalo, V. Polkovnikov, M. Svechnikov, M Zorina // J. Appl. Crystallogr. – 2021. – Vol. 54. – № 6. – P. 1747–1756. DOI: https://doi.org/10.1107/S160057672101027X
- 31. Madenci E., Guven I. The finite element method and applications in engineering using ANSYS. NY: Springer, 2015. DOI: https://doi.org/10.1007/978-1-4899-7550-8
- 32. Akin J.E. Finite element analysis concepts: via SolidWorks. New Jersey: World Scientific, 2010. 348 p. DOI: https://doi.org/10.1142/7785
- 33. Planar sets of cross x-ray refractive lenses from SU-8 polymer. / V.P. Nazmov, E.F. Reznikova, A. Somogyi, J. Mohr, V. Saile // Proc. SPIE. – 2004. – Vol. 5539. – P. 235–243. DOI: https://doi.org/10.1117/12.562615
- 34. Scanning high-sensitive x-ray polarization microscopy. / B. Marx-Glowna, B. Grabiger, R. Lötzsch, I. Uschmann, A.T. Schmitt, K.S. Schulze, A. Last, T. Roth, S. Antipov, H.-P. Schlenvoigt, I. Sergueev, O. Leupold, R. Röhlberger, G.G. Paulus // New J. Phys. – 2022. – Vol. 24. – № 5. – 053051 p. DOI: https://doi.org/10.1088/1367-2630/ac6e80
- 35. Stand for certification of X-ray optical elements and systems for synchrotron applications. / D.G. Reunov, A.D. Akhsakhalyan, E.I. Glushkov, I.G. Zabrodin, I.V. Malyshev, M.S. Mikhailenko, E.V. Petrakov, A.K. Chernyshev, N.I. Chkhalo // J. Surf. Invest. X-ray. – 2024. – Vol. 18. – № Suppl 1 – P. S38–S44.
- 36. Upscaling X-ray nanoimaging to macroscopic specimens. / M. Du, Z. Di, D. Gürsoy, R.P. Xian, Y. Kozorovitskiy, C. Jacobsen // J. Appl. Crystallogr. – 2021. – Vol. 54. – № 2. – P. 386–401. DOI: https://doi.org/10.1107/S1600576721000194
- Extending the methodology of X-ray crystallography to allow imaging of micrometre-sized non-crystalline specimens. / J. Miao, P. Charalambous, J. Kirz, D. Sayre // Nature. – 1999. – Vol. 400. – № 6742. – P. 342–344. DOI: https://doi.org/10.1038/22498
- 38. Current status of single particle imaging with X-ray lasers. / Z. Sun, J. Fan, H. Li, H. Jiang // Appl. Sci. 2018. Vol. 8. № 1. – Article number 132 – P. 1-28. DOI: https://doi.org/10.3390/app8010132

- 39. Thibault P., Guizar-Sicairos M., Menzel A. Coherent imaging at the diffraction limit. Erratum. // J. Synchrotron Radiat. 2014. Vol. 21. № 5. P. 1011–1018. DOI: https://doi.org/10.1107/S1600577515001575
- 40. Morgan K.S., Paganin D.M., Siu K.K.W. X-ray phase imaging with a paper analyzer. // Appl. Phys. Lett. 2012. Vol. 100. № 12. DOI: https://doi.org/10.1063/1.3694918
- 41. Multimodal intrinsic speckle-tracking (MIST) to extract images of rapidly-varying diffuse X-ray dark-field. / S.J. Alloo, K.S. Morgan, D.M. Paganin, K.M. Pavlov // Sci. Rep. 2023. Vol. 13. № 1. Article number 5424. DOI: https://doi.org/10.1038/s41598-023-31574-z
- 42. Exploring experimental parameter choice for rapid speckle-tracking phase-contrast X-ray imaging with a paper analyzer. / I.A. Aloisio, D.M. Paganin, C.A. Wright, K.S. Morgan // J. Synchrotron Radiat. 2015. Vol. 22. № 5. P. 1279–1288. DOI: https://doi.org/10.1107/S1600577515011406
- 43. Berujon S., Wang H., Sawhney K.J.S. At-wavelength metrology using the X-ray speckle tracking technique: case study of a X-ray compound refractive lens. // J. Phys.: Conf. Ser. 2013. Vol. 425. № 5. 052020 p. DOI: https://doi.org/10.1088/1742-6596/425/5/052020
- 44. At-wavelength metrology of hard X-ray mirror using near field speckle. / S. Berujon, H. Wang, S. Alcock, K. Sawhney // Opt. Express. 2014. Vol. 22. № 6. P. 6438–6446. DOI: https://doi.org/10.1364/OE.22.006438

# Информация об авторах

**Яков Валерьевич Ракшун**, кандидат физико-математических наук, заведующий кафедрой систем автоматизированного проектирования, Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Россия, 630102, г. Новосибирск, ул. Кирова, 86. https://orcid.org/0000-0001-7444-4200, rakshun@mail.ru

**Юрий Вадимович Хомяков**, инженер-исследователь сектора 8-21, Институт ядерной физики имени. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук, Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 11. https://orcid.org/0000-0001-9501-7179, yu.v.khomyakov@yandex.ru

**Егор Ильич Глушков**, младший научный сотрудник, лаборатория коротковолновой прецизионной оптики и перспективного приборостроения, Институт физики микроструктур Российской академии наук, Россия, 603950, г. Нижний Новгород, ГСП-105; eglushkov@ipmras.ru

**Алексей Сергеевич Гоголев**, кандидат физико-математических наук, проректор по науке и стратегическим проектам, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. https://orcid.org/0000-0002-7067-0478, gogolev@tpu.ru

**Максим Викторович Горбачев**, кандидат технических наук, заведующий кафедрой технической теплофизики, Новосибирский государственный технический университет, Россия, 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. https://orcid.org/0000-0002-9747-3554, m.gorbachev@corp.nstu.ru

Андрей Викторович Дарьин, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, лаборатория литогеодинамики осадочных бассейнов (220), Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук, Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3; avd@igm.nsc.ru

**Федор Андреевич Дарьин**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник. Центр коллективного пользования "Сибирский кольцевой источник фотонов" Института катализа им. Г.К. Борескова Сибирского отделения Российской академии наук, Россия, 630559, Новосибирская область, р.п. Кольцово, пр. Никольский, 1; f.a.darin@inp.nsk.su

**Игорь Петрович Долбня**, Ph.D, ответственный за линию луча Diamond Light Source, Великобритания, OX11 0DE, Оксфордшир, г. Дидкот, Харвеллский научный и инновационный кампус; igor.dolbnya@diamond.ac.uk

**Сергей Владимирович Ращенко**, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, лаборатория метаморфизма и метасоматизма, Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук, Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3; rashchenko@igm.nsc.ru

**Владимир Александрович Чернов**, ведущий инженер, Институт ядерной физики имени. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук, Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 11; v.a.chernov@mail.ru

**Николай Иванович Чхало**, доктор физико-математических наук, заведующий отделом многослойной рентгеновской оптики, Институт физики микроструктур Российской академии наук, Россия, 603950, г. Нижний Новгород, ГСП-105; chkhalo@ipm.sci-nnov.ru

**Марат Рашидович Шарафутдинов**, кандидат химических наук, старший научный сотрудник, Центр коллективного пользования "Сибирский кольцевой источник фотонов" Института катализа им. Г.К. Борескова Сибирского отделения Российской академии наук, Россия, 630559, Новосибирская область, р.п. Кольцово, пр. Никольский, 1; marat@solid.nsc.ru

Поступила в редакцию: 10.04.2025 Поступила после рецензирования: 30.04.2025 Принята к публикации: 30.04.2025

#### REFERENCES

- 1. Thibault P., Dierolf M., Menzel A., Bunk O., David C., Pfeiffer F. High-resolution scanning x-ray diffraction microscopy. *Science*, 2008, vol. 321, no. 5887, pp. 379–382. DOI: https://doi.org/10.1126/science.1158573
- 2. Holler M., Guizar-Sicairos M., Tsai E., Dinapoli R., Müller E., Bunk O., Raabe J., Aeppli G. High-resolution non-destructive three-dimensional imaging of integrated circuits. *Nature*, 2017, vol. 543, pp. 402–406. DOI: https://doi.org/10.1038/nature21698
- Kewish M., Thibault P., Dierolf M., Bunk O., Menzel A., Vila-Comamala J., Jefimovs K., Pfeiffer F. Ptychographic characterization of the wavefield in the focus of reflective hard X-ray optics. *Ultramicroscopy*, 2010, vol. 110, Iss. 4, pp. 325–329. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ultramic.2010.01.004
- Patommel J., Klare S., Hoppe R., Ritter S., Samberg D., Wittwer F., Jahn A., Richter K., Wenzel C., Bartha J.W., Scholz M., Seiboth F., Boesenberg U., Falkenberg G., Schroer C.G. Focusing hard x rays beyond the critical angle of total reflection by adiabatically focusing lenses. *Appl. Phys. Lett.*, 2017, vol. 110, Iss. 10, article number 101103. DOI: https://doi.org/10.1063/1.4977882
- Kuppili V.S.C., Ball M., Batey D., Dodds K., Cipiccia S., Wanelik K., Fu R., Rau C., Harrison R.J. Nanoscale imaging of Fe-rich inclusions in single-crystal zircon using X-ray ptycho-tomography. *Sci. Rep.*, 2024, vol. 14, Article number 5139. DOI: https://doi.org/10.1038/s41598-024-55846-4
- 6. Fienup J.R. Reconstruction of an object from the modulus of its Fourier transform. *Opt. Lett.*, 1978, vol. 3, Iss. 1, pp. 27–29. DOI: https://doi.org/10.1364/OL.3.000027
- Aidukas T., Phillips N.W., Diaz A., Poghosyan E., Müller E., Levi A.F.J., Aeppli G., Guizar-Sicairos M., Holler M. Highperformance 4-nm-resolution X-ray tomography using burst ptychography. *Nature*, 2024, vol. 632, pp. 81–88. DOI: https://doi.org/10.1038/s41586-024-07615-6
- 8. Dierolf M., Menzel A., Thibault P., Schneider P., Kewish C.M., Wepf R., Bunk O., Pfeiffer F. Ptychographic X-ray computed tomography at the nanoscale. *Nature*, 2010, vol. 467, pp. 436–439. DOI: https://doi.org/10.1038/nature09419
- De Boever W., Diaz A., Derluyn H., De Kock T., Van Stappen J., Dewanckele J., Bultreys T., Boone M., De Schryver T., Skjønsfjell E.T.B., Holler M., Breiby D.W., Cnudde V. Characterization of composition and structure of clay minerals in sandstone with ptychographic X-ray nanotomography. *Appl. Clay Sci.*, 2015, vol. 118, pp. 258–264. DOI: https://doi.org/10.1016/j.clay.2015.09.020
- Trtik P., Diaz A., Guizar-Sicairos M., Menzel A., Bunk O. Density mapping of hardened cement paste using ptychographic X-ray computed tomography. *Cem. Concr. Compos.*, 2013, vol. 36, pp. 71–77. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.06.001
- 11. Darin F.A. Development of the confocal X-ray microscopy method for studying microinclusions in various geological matrices. Cand. Diss. Novosibirsk, 2022. 141 p. (In Russ.)
- 12. Deng J., Vine D.J., Chen S., Jin Q., Nashed Y.S.G., Peterka T., Vogt S., Jacobsen C. X-ray ptychographic and fluorescence microscopy of frozen-hydrated cells using continuous scanning. *Sci. Rep.*, 2017, vol. 7, Article number 445. DOI: https://doi.org/10.1038/s41598-017-00569-y
- 13. Dubrovinskaia N., Dubrovinsky L. Crystallography taken to the extreme. *Phys. Scr.*, 2018, vol. 93, no. 6, Article number 062501. DOI: https://doi.org/10.1088/1402-4896/aabf25 EDN: MEEUJF
- 14. Bykov M., Khandarkhaeva S., Fedotenko T., Sedmak P., Dubrovinskaya N., Dubrovinsky L. Synthesis of FeN4 at 180 GPa and its crystal structure from a submicron-sized grain. *Acta Crystallogr. E.*, 2018, vol. 74, P. 10, pp. 1392–1395. DOI: https://doi.org/10.1107/S2056989018012161 EDN: FVMSOG
- 15. Baranov G., Bogomyagkov A., Morozov I., Sinyatkin S., Levichev E. Lattice optimization of a fourth-generation synchrotron radiation light source in Novosibirsk. *Phys. Rev. Accel. Beams.*, 2021, vol. 24, Article number 120704. DOI: https://doi.org/10.1103/PhysRevAccelBeams.24.120704
- 16. Shkaruba V.A., Bragin A.V., Volkov A.A., Erokhin A.I., Zorin A.V., Kazantsev F.P., Kanonik P.V., Mezentsev N.A., Safronov A.N., Sedov A.A., Tarasenko O.A., Khrushchev S.V., Tsukanov V.M. Superconducting wigglers and undulators for synchrotron radiation generation at the SKIF storage ring. *Phys. Part. Nucl. Lett.*, 2023, vol. 20, pp. 904–908. DOI: https://doi.org/10.1134/S1547477123040623
- Glushkov E.I., Malyshev I.V., Petrakov E.V., Chkhalo N.I., Khomyakov Yu.V., Rakshun Ya.V., Chernov V.A., Dolbnya I.P. Optimization of the design and parameters of a double-mirror monochromator for the fourth-generation SKIF synchrotron light source. J. Surf. Invest. X-ray, 2023, vol. 17, Suppl 1, pp. S233–S238. DOI: https://doi.org/10.1134/S1027451023070133
- Bigault T., Ziegler E., Morawe C., Hustache R., Massonnat J.Y., Rostaing G. Double multilayer monochromator to tailor bending magnet radiation spectrum. *Proc. SPIE*, 2003, vol. 5195. DOI: https://doi.org/10.1117/12.515980
- Chernov V.A., Bataev I.A., Rakshun Ya.V., Khomyakov Yu.V., Gorbachev M.V., Trebushinin A.E., Chkhalo N.I., Krasnorutskiy D.A., Naumkin V.S., Sklyarov A.N., Mezentsev N.A., Korsunsky A.M., Dolbnya I.P. A concept of "materials" diffraction and imaging beamline for SKIF: Siberian circular photon source. *Rev. Sci. Instrum.*, 2023, vol. 94, Article number 013305. DOI: https://doi.org/10.1063/5.0103481
- 20. Khomyakov Yu.V., Rakshun Ya.V., Chernov V.A. On the correct use of refractive lenses for microscopy with high spatial resolution at fourth-generation synchrotron radiation facilities. *Technical Physics*, 2024, vol. 94, Iss. 7, pp. 1146–1157. (In Russ.) DOI: https://doi.org/10.61011/JTF.2024.07.58351.134-24
- 21. Pfeiffer F. X-ray ptychography. Nature Photon, 2018, vol. 12, pp. 9–17. DOI: https://doi.org/10.1038/s41566-017-0072-5
- 22. Tanaka T. Major upgrade of the synchrotron radiation calculation code SPECTRA. J. Synchrotron Radiat., 2021, vol. 28, pp. 1267–1272. DOI: https://doi.org/10.1107/S1600577521004100

- Del Río M.S., Dejus R. XOP v2.4: recent developments of the x-ray optics software toolkit. *Proc. SPIE*, 2011, vol. 8141, Article number 814115. DOI: https://doi.org/10.1117/12.893911
- 24. RXOPTICS. Available at: https://www.rxoptics.de/ (accessed: 21 March 2025).
- Roth T., Helfen L., Hallmann J., Samoylova L., Kwaśniewski P., Lengeler B., Madsen A. X-ray laminography and SAXS on beryllium grades and lenses and wavefront propagation through imperfect compound refractive lenses. *Proc. SPIE.*, 2014, vol. 9207, Article number 920702. DOI: https://doi.org/10.1117/12.2061127
- 26. Yabashi M., Tono K., Mimura H., Matsuyama S., Yamauchi K., Tanaka T., Tanaka H., Tamasaku K., Ohashi H., Goto S., Ishikawa T. Optics for coherent X-ray applications. J. Synchrotron Radiat., 2014, vol. 21, P. 5, pp. 976–985. DOI: https://doi.org/10.1107/S1600577514016415
- 27. Klementiev K., Chernikov R. Powerful scriptable ray tracing package xrt. *Proc. SPIE*, 2014, vol. 9209, Article number 92090A. DOI: https://doi.org/10.1117/12.2061400
- Shaposhnikov R., Polkovnikov V., Garakhin S., Vainer Y., Chkhalo N., Smertin R., Durov K., Glushkov E., Yakunin S., Borisov M. Investigation of structural and reflective characteristics of short-period Mo/B4C multilayer X-ray mirrors. *J. Synchrotron Radiat*, 2024, vol. 31, P. 2, pp. 268–275. DOI: https://doi.org/10.1107/S1600577524000419
- Bibishkin M.S., Chkhalo N.I., Fraerman A.A., Pestov A.E., Prokhorov K.A., Salashchenko N.N., Vainer Yu.A. Ultra-short period X-ray mirrors: production and investigation. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2005, vol. 543, Iss. 1, pp. 333–339. DOI: https://doi.org/10.1016/j.nima.2005.01.251
- Pleshkov R., Chkhalo N., Polkovnikov V., Svechnikov M., Zorina M. Intrinsic roughness and interfaces of Cr/Be multilayers. J. Appl. Crystallogr., 2021, vol. 54, pp. 1747–1756. DOI: https://doi.org/10.1107/S160057672101027X
- 31. Madenci E., Guven I. *The finite element method and applications in engineering using ANSYS*. NY, Springer New York, 2015. 657 p. DOI: https://doi.org/10.1007/978-1-4899-7550-8
- 32. Akin J.E. Finite element analysis concepts: via SolidWorks. New Jersey, World Scientific, 2010. 348 p. DOI: https://doi.org/10.1142/7785
- 33. Nazmov V.P., Reznikova E.F., Somogyi A., Mohr J., Saile V. Planar sets of cross x-ray refractive lenses from SU-8 polymer. *Proc. SPIE*, 2004, vol. 5539, pp. 235–243. DOI: https://doi.org/10.1117/12.562615
- 34. Marx-Glowna B., Grabiger B., Lötzsch R., Uschmann I., Schmitt A.T., Schulze K.S., Last A., Roth T., Antipov S., Schlenvoigt H.-P., Sergueev I., Leupold O., Röhlberger R., Paulus G.G. Scanning high-sensitive x-ray polarization microscopy. *New J. Phys.*, 2022, vol. 24, no. 5, Article number 053051. DOI: https://doi.org/10.1088/1367-2630/ac6e80
- 35. Reunov D.G., Akhsakhalyan A.D., Glushkov E.I., Zabrodin I.G., Malyshev I.V., Mikhailenko M.S., Petrakov E.V., Chernyshev A.K., Chkhalo N.I. Stand for certification of X-ray optical elements and systems for synchrotron applications. *J. Surf. Invest. X-ray*, 2024, vol. 18, Suppl 1, pp. S38–S44. DOI: https://doi.org/10.1134/S1027451024701842
- 36. Du M., Di Z., Gürsoy D., Xian R.P., Kozorovitskiy Y., Jacobsen C. Upscaling X-ray nanoimaging to macroscopic specimens. *J. Appl. Crystallogr.*, 2021, vol. 54, P. 2, pp. 386–401. DOI: https://doi.org/10.1107/S1600576721000194
- 37. Miao J., Charalambous P., Kirz J., Sayre D. Extending the methodology of X-ray crystallography to allow imaging of micrometre-sized non-crystalline specimens. *Nature*, 1999, vol. 400, pp. 342–344. DOI: https://doi.org/10.1038/22498
- 38. Sun Z., Fan J., Li H., Jiang H. Current status of single particle imaging with X-ray lasers. Appl. Sci., 2018, vol. 8, no. 1, pp. 132. DOI: https://doi.org/10.3390/app8010132
- 39. Thibault P., Guizar-Sicairos M., Menzel A. Coherent imaging at the diffraction limit. Erratum. J. Synchrotron Radiat., 2014, vol. 21, no. 5, pp. 1011–1018. DOI: https://doi.org/10.1107/S1600577515001575
- 40. Morgan K.S., Paganin D.M., Siu K.K.W. X-ray phase imaging with a paper analyzer. *Appl. Phys. Lett.*, 2012, vol. 100, Iss. 12, Article number 124102. DOI: https://doi.org/10.1063/1.3694918
- Alloo S.J., Morgan K.S., Paganin D.M., Pavlov K.M. Multimodal intrinsic speckle-tracking (MIST) to extract images of rapidly-varying diffuse X-ray dark-field. *Sci. Rep.*, 2023, vol. 13, no. 1, Article number 5424. DOI: https://doi.org/10.1038/s41598-023-31574-z
- 42. Aloisio I.A., Paganin D.M., Wright C.A., Morgan K.S. Exploring experimental parameter choice for rapid speckle-tracking phase-contrast X-ray imaging with a paper analyzer. *J. Synchrotron Radiat.*, 2015, vol. 22, pp. 1279–1288. DOI: https://doi.org/10.1107/S1600577515011406
- Berujon S., Wang H., Sawhney K.J.S. At-wavelength metrology using the X-ray speckle tracking technique: case study of a X-ray compound refractive lens. J. Phys.: Conf. Ser., 2013, vol. 425, article number 052020. DOI: https://doi.org/10.1088/1742-6596/425/5/052020
- 44. Berujon S., Wang H., Alcock S., Sawhney K. At-wavelength metrology of hard X-ray mirror using near field speckle. *Opt. Express.*, 2014, vol. 22, Iss. 6, pp. 6438–6446. DOI: https://doi.org/10.1364/OE.22.006438

#### Information about the authors

**Yakov V. Rakshun**, Cand, Sc., Head of the CAD Department, Siberian State University of Telecommunications and Information Science, 86, Kirov street, Novosibirsk, 630102, Russian Federation. https://orcid.org/0000-0001-7444-4200, rakshun@mail.ru

**Yuri V. Khomyakov**, Research Engineer, sector 8-21, Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS, 11, Academician Lavrentyev avenue, Novosibirsk, 630090, Russian Federation; https://orcid.org/0000-0001-9501-7179, yu.v.khomyakov@yandex.ru

**Egor I. Glushkov**, Junior Researcher, Institute for Physics of Microstructures RAS, GSP-105, Nizhny Novgorod, 603950, Russian Federation; eglushkov@ipmras.ru

**Alexey S. Gogolev**, Cand. Sc., Vice-Rector for Science and Strategic Projects, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. https://orcid.org/0000-0002-7067-0478, gogolev@tpu.ru

**Maxim V. Gorbachev,** Cand. Sc., Head of the of Technical Thermal Physics Department, Novosibirsk State Technical University, 20, K. Marks avenue, Novosibirsk, 630073, Russian Federation. https://orcid.org/0000-0002-9747-3554, m.gorbachev@corp.nstu.ru

**Andrey V. Darin**, Cand. Sc., Senior Researcher, V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, 3, Academician Koptyug avenue, Novosibirsk, 630090, Russian Federation; avd@igm.nsc.ru

**Fedor A. Darin**, Cand. Sc., Senior Researcher, Center for Collective Use "Siberian Ring Photon Source" of the Institute of Catalysis SB RAS, 1, Nikolsky avenue, Koltsovo, Novosibirsk region, 630559, Russian Federation; f.a.darin@inp.nsk.su

**Igor P. Dolbnya**, PhD, Diamond Light Source Beamline Responsible Person, Harwell Science and Innovation Campus, Didcot, Oxfordshire, OX11 0DE, United Kingdom; igor.dolbnya@diamond.ac.uk

**Sergey V. Rashchenko**, Cand. Sc., Senior Researcher, V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, 3, Academician Koptyug avenue, Novosibirsk, 630090, Russian Federation; rashchenko@igm.nsc.ru

**Vladimir A. Chernov**, Leading Engineer, Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS, 11, Academician Lavrentyev avenue, Novosibirsk, 630090, Russian Federation; v.a.chernov@mail.ru

**Nikolay I. Chkhalo**, Dc. Sc., Head of the Multilayer X-ray Optics Department, Institute for Physics of Microstructures RAS, GSP-105, Nizhny Novgorod, 603950, Russian Federation; chkhalo@ipm.sci-nnov.ru

**Marat R. Sharafutdinov**, Cand. Sc., Senior Researcher, Center for Collective Use "Siberian Ring Photon Source" of the Institute of Catalysis SB RAS, 1, Nikolsky avenue, Koltsovo, Novosibirsk region, 630559, Russian Federation; marat@solid.nsc.ru

Received: 10.04.2025 Revised: 30.04.2025 Accepted: 30.04.2025

Компьютерная верстка О.Ю. Аршинова Корректура и перевод на английский язык С.В. Жаркова Дизайн обложки Т.В. Буланова

Фотографии на обложке взяты из личного архива Валерия Касаткина

Руководство для авторов и образец оформления статьи: izvestiya.tpu.ru

Подписано к печати 28.05.2025. Дата выхода журнала: 30.05.2025. Формат 60х84/8 (А4). Бумага «Снегурочка». Печать XEROX. Усл. печ. л. 29,31. Уч.-изд. л. 26,51. Заказ 245-25. Тираж 500 экз. Цена свободная.



Адрес учредителя, редакции, издателя, типографии: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.