



**ТОМСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ**

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

**ИЗВЕСТИЯ
ТОМСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
ИНЖИНИРИНГ ГЕОРЕСУРСОВ**

Том 336, № 7, 2025

Издательство
Томского политехнического университета
2025

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

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



**TOMSK
POLYTECHNIC
UNIVERSITY**

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

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

Volume 336, № 7, 2025

EDITORIAL BOARD

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

AIMS AND SCOPES

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

The journal was founded in 1903.

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

ISSN (print) – 2500-1019

ISSN (on-line) – 2413-1830

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

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

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

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

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

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

The publication of manuscripts is free of charge.

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

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENTS

- Вещественный состав позднепалеозойских габбро-диоритовых массивов Шарагольского комплекса Унго-Хилокского ареала, Центральное Забайкалье, Россия**
Бадмацыренова Р.А., Шелепов Я.Ю.
- Обоснование и разработка отклонителя непрерывного действия с полным отбором керна для бурения геологоразведочных скважин**
Блинов П.А., Силичев Н.М., Никишин В.В., Гореликов В.Г.
- Универсальная система критериев выбора автосамосвалов для глубоких карьеров**
Бурмистров К.В., Осинцев Н.А., Рахмангулов А.Н., Багдасарян М.А.
- Моделирование прогрева прискважинной зоны пласта с помощью индукционного нагревателя**
Космылин Д.В., Федотов В.Я., Давлетшин Ф.Ф., Шарафутдинов Р.Ф., Валиуллин Р.А.
- Типизация карбонатных пород-коллекторов с применением метода накопленной корреляции и индивидуальных вероятностных моделей на примере месторождений Южно-Хорейверской площади**
Путилов И.С., Жемчугова Т.А.
- Комплексная технология переработки диопсида с получением скандиевого концентрата и минеральных продуктов**
Зайцева А.Д., Кузин Е.Н., Кручинина Н.Е., Галактионов С.С., Краснощечков А.Н.
- Обзор сшитых полимерных композиций для повышения нефтеотдачи пластов**
Подопригора Д.Г., Маркушина Ф.Д.
- Модифицированный нефтесорбент из свежловичного жома для очистки поверхностной воды от нефти**
Мельникова А.С., Кострюкова Н.В.
- Исследование процесса кислотно-восстановительного выщелачивания ванадия из летучей золы ТЭЦ**
Мишин И.В., Нистратов А.В., Пичугов Р.Д.
- Повышение эффективности освоения золоторудных месторождений путем применения гибкой схемы управления качеством руд при их транспортировке**
Чебан А.Ю.
- Исследования углеродных материалов и их ресурсные испытания в качестве анодов при производстве фтора**
Софронов В.Л., Ткачук С.А., Жиганов А.Н., Житков С.А.
- Интенсификация жидкофазных процессов синтеза линейных алкилбензосульфокислот в условиях дезактивации реакционных сред**
Долганова И.О., Долганов И.М., Ивашкина Е.Н.
- Технология профилактического поворота трубопровода, подверженного канавочной коррозии**
Султанмагомедов Т.С., Султанмагомедов С.М., Шамилов Х.Ш., Урманова А.Р.
- Material composition of the Sharagol complex gabbro-diorite Late Paleozoic massifs of the Ungo-Khilok area, Central Transbaikalia, Russia**
Badmatsyrenova R.A., Shelepov Ya.Yu.
- Justification and development of a continuous deflector with full core sampling for drilling exploration wells**
Blinov P.A., Silichev N.M., Nikishin V.V., Gorelikov V.G.
- Universal system of criteria for selecting deep open pit dump trucks**
Burmistrov K.V., Osintsev N.A., Rakhmangulov A.N., Bagdasaryan M.A.
- Modeling the heating of the reservoir near-wellbore zone using an induction heater**
Kosmylin D.V., Fedotov V.Ya., Davletshin F.F., Sharafutdinov R.F., Valiullin R.A.
- Typing carbonate reservoir rocks using the accumulated correlation method and individual probabilistic models on the example of fields in the Yuzhno-Khoreyverskaya area**
Putilov I.S., Zhemchugova T.A.
- Complex technology for processing diopside to produce scandium concentrate and mineral products**
Zaytseva A.D., Kuzin E.N., Kruchinina N.E., Galaktionov S.S., Krasnoshchekov A.N.
- Overview of crosslinked polymer compositions for enhanced oil recovery**
Podoprigora D.G., Markushina F.D.
- Modified oil sorbent from beet pulp for surface water purification from oil**
Melnikova A.S., Kostryukova N.V.
- Vanadium acid-reducing leaching from the fly ash of a thermal power plant**
Mishin I.V., Nistratov A.V., Pichugov R.D.
- Improving the efficiency of gold ore deposit development by using a flexible ore quality management scheme during their transportation**
Cheban A.Yu.
- Carbon materials and their resource tests as anodes in fluorine production**
Sofronov V.L., Tkachuk S.A., Zhiganov A.N., Zhitkov S.A.
- Intensification of liquid-phase processes for the synthesis of linear alkylbenzenesulfonic acids under conditions of the reaction media deactivation**
Dolganova I.O., Dolganov I.M., Ivashkina E.N.
- Technology of preventive turnaround of pipelines subject to groove corrosion**
Sultanmagomedov T.S., Sultanmagomedov S.M., Shamilov Kh.Sh., Urmanova A.R.

- | | |
|---|--|
| <p>Золоторудное месторождение Сухой Лог (Патомское нагорье). Часть I. Постановка проблемы, геодинамическая обстановка и геологическое строение
 Слоквенко В.В., Колмаков Ю.В.</p> <p>Исследование переходных процессов осциллирующего метода управления сушкой древесины для синтеза алгоритмов подстройки параметров резистивных датчиков влажности
 Гречушников В.В., Прохоров С.В., Шилин А.А.</p> <p>Бензол, толуол в природных водах восточного обрамления Сибирской платформы в связи с оценкой перспектив нефтегазоносности
 Малков Д.С., Сурнин А.И., Гусева Н.В.</p> <p>Структурно-метасоматическая модель медно-порфирового рудного поля Актогай по материалам дистанционных съемок (северо-восточное Прибалхашье)
 Сейров Ф.Е., Ананьев Ю.С.</p> <p>Оценка эколого-геохимического состояния территории г. Кемерово на основе изучения снегового покрова (Кемеровская область)
 Новикова В.Д., Таловская А.В., Язиков Е.Г.</p> <p>Геохимические типы подземных вод юго-восточного Забайкалья
 Дребот В.В., Лепокурова О.Е., Борзенко С.В.</p> <p>Применение ИК-спектроскопии диффузного отражения в молекулярной палеонтологии
 Иванов В.П., Рычкова И.В., Пахтаева М.Г.</p> | <p>156 Sukhoy Log gold ore deposit (Patom Highlands). Part I. Problem statement, geodynamic setting and geological structure
 Slokvenko V.V., Kolmakov Yu.V.</p> <p>174 Transient processes of oscillating method of wood drying control for synthesis of algorithms for adjustment of parameters of resistive humidity sensors
 Grechushnikov V.V., Prokhorov S.V., Shilin A.A.</p> <p>189 Benzene and toluene in the natural waters of the eastern rim of the Siberian platform by oil and gas potential assessment
 Malkov D.S., Surnin A.I., Guseva N.V.</p> <p>197 Structural-metasomatic model of the Aktogai porphyry copper ore field based on remote sensing (north-eastern Balkhash region)
 Seirov F.E., Ananyev Yu.S.</p> <p>210 Eco-geochemical assessment of Kemerovo city using snow cover (Kemerovo region)
 Novikova V.D., Talovskaya A.V., Yazikov E.G.</p> <p>224 Geochemical types of groundwater in South-Eastern Transbaikalia
 Drebot V.V. Lepokurova O.E., Borzenko S.V.</p> <p>238 Diffuse reflectance IR spectroscopy in molecular paleontology
 Ivanov V.P., Rychkova I.V., Pakhtaeva M.G.</p> |
|---|--|

УДК 552.31

DOI: 10.18799/24131830/2025/7/4760

Шифр специальности ВАК: 1.6.1

Научная статья

Вещественный состав позднепалеозойских габбро-диоритовых массивов Шарагольского комплекса Унго-Хилокского ареала, Центральное Забайкалье, Россия

Р.А. Бадмацыренова^{1,2✉}, Я.Ю. Шелепов³

¹ Институт геохимии СО РАН, Россия, г. Иркутск

² Иркутский национальный исследовательский технический университет, Россия, г. Иркутск

³ Институт геологии и минералогии СО РАН, Россия, г. Новосибирск

✉ roza1977@mail.ru

Аннотация. *Актуальность* исследования обусловлена дефицитом информации о вещественном составе пород, составляющих габбро-диоритовые массивы, их роли в формировании континентальной коры и времени проявления основного-среднего магматизма на данной территории. *Цель.* Исследование направлено на изучение геологического строения, характеристику вещественного состава пород и определение временных рамок развития основного магматизма в пределах Центрального Забайкалья. *Методы:* комплексные структурно-геологические исследования с учетом ранее проведенных тематических, поисково-съёмочных, геологоразведочных работ. Для анализа вещественного состава магматических пород широко применялись современные петролого-геохимические и изотопно-геохронологические методы с использованием в качестве элементов индикаторов состав редких и редкоземельных элементов, микронзондовые определения минералов, а также изотопные (U-Pb) данные. *Результаты и выводы.* Установлено, что в строении массива участвуют породы основного и среднего состава с преобладанием габброидов, образованных в результате фракционной кристаллизации родоначального расплава, отвечающего высокоглинозему базальту. Показано, что источником верхнепалеозойских габбро-диоритовых массивов была шпинель-лещерцолитовая мантия, плавление которой происходило в гидратированных условиях. По результатам U-Pb-анализа магматических цирконов, выделенных из габбро Хорульского массива, получен возраст 337 ± 3 млн лет. Предполагается, что формирование пород массивов связано с процессами внутримантийного магматизма на посторогенной стадии с участием плюмового магматизма.

Ключевые слова: габбро, диориты, петрохимия, геохимия, U-Pb возраст, шарагольский комплекс

Благодарности: Работа осуществлена с использованием научного оборудования Центра коллективного пользования «Изотопно-геохимические исследования» Института геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН (г. Иркутск), Центра коллективного пользования «Геоспектр» Геологического института им. Н.Л. Добрецова СО РАН (г. Улан-Удэ). Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации на проведение НИР ИГХ СО РАН по теме № 0284-2021-0006.

Для цитирования: Бадмацыренова Р.А., Шелепов Я.Ю. Вещественный состав верхнепалеозойских габбро-диоритовых массивов Шарагольского комплекса Унго-Хилокского ареала, Центральное Забайкалье, Россия // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 7. – С. 7–16. DOI: 10.18799/24131830/2025/7/4760

UDC 552.31

DOI: 10.18799/24131830/2025/7/4760

Scientific paper

Material composition of the Sharagol complex gabbro-diorite Late Paleozoic massifs of the Ungo-Khilok area, Central Transbaikalia, Russia

R.A. Badmatsyrenova^{1,2✉}, Ya.Yu. Shelepov³

¹ A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS, Irkutsk, Russian Federation

² Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation

³ V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation

✉ roza1977@mail.ru

Abstract. Relevance. The significance of the research is determined by the lack of information on the composition of rocks of the gabbro-diorite intrusion and their role in continental crust formation and the age of manifestation of basic-intermediate magmatism on this area. **Aim.** To investigate geological structure and describe of the rock material composition and to determine the time frame of the development of the main magmatism within the Central Transbaikalia region. **Methods.** Complex structural-geological researches including explorative-surveying and geological-prospecting works carried out earlier. The analysis of the material composition of magmatic rocks is performed by means of modern petrological-geochemical and isotope-geochronological methods using the composition of rare and rare-earth elements, microprobe minerals identification as well as isotope (U-Pb) data. **Results and conclusions.** The intrusion consists of basic and intermediate rocks with a predominance of gabbroids formed as a result of fractional crystallization of the parent melt corresponding to high-alumina basalt. The Late Paleozoic gabbro-diorite rocks originated from the spinel-bearing lherzolitic mantle, which melted under «hydration conditions». By the results of U-Pb analysis of magmatic zircon from a gabbro sample of the Khorul massif yielded the age of 337 ± 3 Ma was obtained. It is assumed that the formation of intrusions is associated with the intraplate magmatism at the post-orogenic stage with the participation of plume magmatism.

Keywords: gabbro, diorites, petrochemistry, geochemistry, U-Pb age, Sharagolsky complex

Acknowledgments: The research was carried out using the scientific equipment of the Multiple-Access Center “Isotopic-Geochemical Studies” of the A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS (Irkutsk), Analytical Center “Geospectr” of the N.L. Dobretsov Geological Institute of SB RAS (Ulan-Ude). This work was carried out within the framework of a State Assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation to carry out R&D of the Vinogradov Institute of Geochemistry, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, on theme no. 0284-2021-0006

For citation: Badmatsyrenova R.A., Shelepov Ya.Yu. Material composition of the Sharagolsky complex gabbro-diorite Late Paleozoic massifs of the Ungo-Khiloksky area, Central Transbaikalia, Russia. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 7, pp. 7–16. DOI: 10.18799/24131830/2025/7/4760

Введение

В Центральном Забайкалье в 60-х гг. прошлого столетия в процессе геолого-съёмочных работ был закартирован ряд массивов габбро-диоритового состава, среди которых выделяется Унго-Хилокский ареал [1]. И.В. Гордиенко в своих исследованиях на основании взаимоотношений между интрузивными комплексами выделил массивы габброидов шарагольского комплекса раннепермского возраста [2, 3]. Ввиду немногочисленных данных по определению возраста по данным массивам на изданной позднее геологической карте породы шарагольского комплекса были отнесены к моностойскому комплексу раннего палеозоя [4]. Этот комплекс впервые выделил О.А. Богатиковым в 1966 г. на основе изучения Арсеньевского массива габброидов, расположенного

в хребте Моностой [5]. Однако детальных исследований на данных массивах не проводилось. В настоящей работе приведены первые данные по геологическому строению, изотопному возрасту и вещественному составу базитового магматизма, которые позволяют в полной мере определить временные уровни и характер основного магматизма на данной территории.

Материалы и методы исследования

Основными методами лабораторных исследований были петрографический (микроскоп SOPTOP RX50M), геохимический и электронно-микроскопический. Петро- и геохимические исследования габброидов включали в себя определение содержаний петрогенных оксидов и ряда элементов-примесей.

Определение содержаний главных петрогенных оксидов в породах выполнено стандартным силикатным анализом, некоторых микроэлементов – методами атомно-абсорбционного (Cr, Co), рентгенофлуоресцентного (Ni, Cu, Sr, Zr, Ba) анализа на установке VRA-30 в ЦКП ГИН СО РАН г. Улан-Удэ. Концентрации редких (Cs, Rb, Th, U, Nb, Ta, Hf) и редкоземельных элементов (РЗЭ) определены методом ICP-MS на масс-спектрометре ELEMENT-2 в Аналитическом ЦКП ИНЦ СО РАН (г. Иркутск). Химический состав породообразующих минералов определялся на электронном сканирующем микроскопе LEO 1430 VP, оснащенный энергодисперсионным спектрометром INCA Energy 350 в ЦКП ГИН СО РАН (г. Улан-Удэ).

Формулы пироксенов рассчитывались на 6 атомов кислорода, для амфиболов применялся расчет на 23 атома кислорода по методу, изложенному в работе [6]. Аббревиатуры минералов, использованные нами на рисунках, соответствуют таковым, рекомендованным в работе [7], либо минералы обозначены формулой, примерно соответствующей их химическому составу.

Мономинеральные пробы цирконов для определения U-Pb изотопных отношений исследовались методом магнитно-секторной масс-спектрометрии с лазерным пробоотбором (LA-SF-ICP-MS). U/Pb-датирование зерен циркона было проведено в Центре многоэлементных и изотопных исследований ИГМ СО РАН (г. Новосибирск). Измерения проводились на масс-спектрометре высокого разрешения с индуктивно связанной плазмой Thermo Scientific Element XR, соединенном с системой лазерной абляции New Wave Research UP 213, на основе ультрафиолетового Nd: YAG лазера с длиной волны 213 нм. Параметры измерения масс-спектрометра оптимизировали для получения максимальной интенсивности сигнала ^{208}Pb при минимальном значении $^{248}\text{ThO}+^{232}\text{Th}+$ (менее 2 %), используя стандарт NIST SRM612. Все измерения выполняли по массам ^{202}Hg , $^{204}(\text{Pb}+\text{Hg})$, ^{206}Pb , ^{207}Pb , ^{208}Pb , ^{232}Th , ^{235}U , ^{238}U . Съемка проводилась в режиме E-scan. Детектирование сигналов проводилось в режиме счета (counting) для всех изотопов, кроме ^{238}U и ^{232}Th (режим triple). Диаметр лазерного луча составлял 30 мкм, частота повторения импульсов 5 Hz и плотность энергии лазерного излучения 3,0–3,5 Дж/см². Данные масс-спектрометрических измерений обрабатывали с помощью программы «Glitter» (GEMOC, Griffin et al., 2008). U-Pb изотопные отношения нормализовали на соответствующие значения изотопных отношений стандартных цирконов GJ-1 [8, 9]. Погрешности единичных анализов изотопных отношений и возрастов приведены на уровне 1σ. Катодолуминисцентные изображения были получены на сканирующем электронном микроскопе LEO-1430.

Результаты исследования

В Центральном Забайкалье в пределах Хилок-Витимской структурно-формационной зоны выделен монотойский комплекс габбровый [3], представленный интрузивными основными и средними породами. Породы комплекса распространены на водораздельной части Малханского хребта и его отрогах, где слагают многочисленные, различной величины и формы, пластообразные ксенолиты среди более молодых интрузивных пород кислого состава. В пределах Унго-Хилокского ареала изучены два габбро-диоритовых массива. Хасуртайский массив (16 км²) расположен в нижнем течении р. Хасуртай и по правому борту р. Унго. Хорульский массив (45 км²) расположен в нижнем течении р. Хорул и по правому борту р. Унго (рис. 1).

Петрографо-минералогическая характеристика пород

Преобладающими породами массивов являются габброиды. В эту группу относятся оливиновое габбро, габбро, габбронориты (рис. 2, а–в). Габбро по соотношению плагиоклаза и темноцветных минералов изменяются от мелано- до мезократовых разновидностей. Этим породам свойственен котектический плагиоклаз-клинопироксеновый парагенезис. Слагающие породу минералы обладают примерно одинаковым идиоморфизмом, что характерно для габбровой структуры. Редко отмечается габбро-офитовая структура. Для авгита (En₄₀₋₃₈, Fs₁₁₋₁₂, Wo₄₇₋₄₉, 25–45 об. %) типичны идиоморфные выделения, ойокристаллы. Плагиоклаз (An₉₅₋₈₀, 60–70 об. %) в большинстве своем наблюдается в виде лейст. В интерстициях главных минералов присутствует в небольших количествах амфибол, представленный магнезиальной роговой обманкой (5–10 об. %). Широко развиты ильменит и магнетит с характерными взаимными пластинчатыми структурами распада твердого раствора. Оливиновое габбро по текстурно-структурным признакам аналогичны габбро, отличаясь от них постоянным присутствием оливина (69–70 % Fa). Габбронориты сложены плагиоклазом (An₇₀₋₈₀) и клинопироксеном (En₄₀₋₄₂, Fs₁₁₋₁₃, Wo₄₃₋₄₈, 25–45 об. %) с ойокристаллами и мелкими изометричными зернами энстатита (En₇₃, Fs₂, Wo₂₅, 5–10 об. %).

Анортозитовая группа представлена анортозитами, содержащими более 90 об. % основного плагиоклаза (An₇₈₋₉₁). Анортозиты характеризуются аллотриоморфнозернистой структурой и наибольшей степенью изменения пород (рис. 2, г).

Монцодиориты и диориты встречаются по периферии массивов и представляют собой породы, сложенные плагиоклазом (An₂₅₋₅₀), амфиболом (магнезиальная роговая обманка) и клинопироксеном (En₃₈₋₅₄, Fs₁₇₋₂₀, Wo₂₅₋₄₄, 20–30 об. %). Структура пород аллотриоморфнозернистая (рис. 2, д, е).

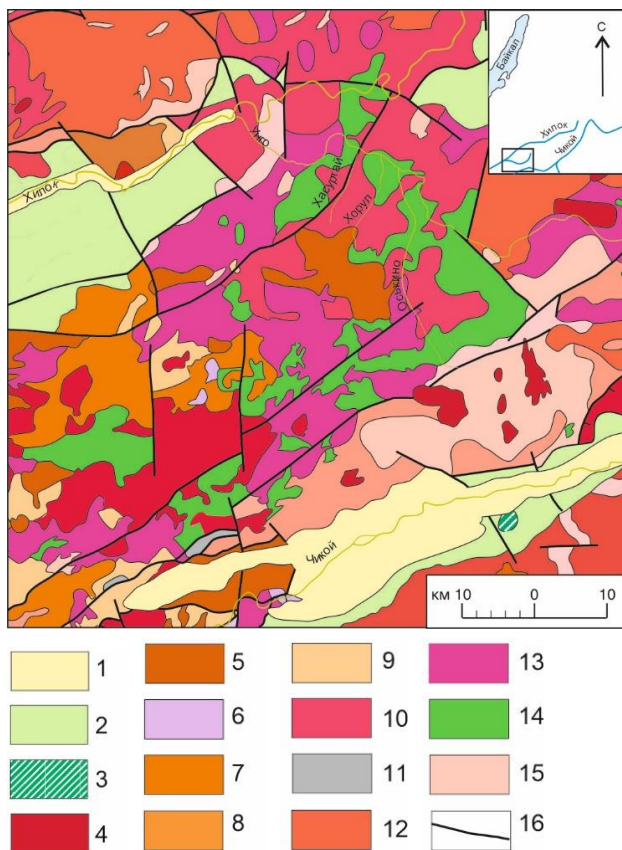


Рис. 1. Геологическая карта габбро-диоритовых массивов Унго-Хилокского ареала [3]. 1 – четвертичные отложения; 2 – раннемеловая осадочно-вулканогенная доронинская свита; 3 – раннемеловой доронинский комплекс трахибазальт-трахириолитовый; 4 – позднеюрский яблоновый комплекс гнейсо-гранит-лейкогранитовый; 5 – раннетриасовый куналейский комплекс щелочной гранит-сиенитовый; 6 – раннетриасовая вулканогенно-осадочная цаган-хунтейская свита; 7 – позднепермский бичурский комплекс габбро-монзонит-гранитовый; 8 – позднепермский соготинский комплекс монзонит-сиенитовый; 9 – позднепермская осадочно-вулканогенная тамирская свита; 10 – средне-позднекарбоневый витимканский комплекс сиенит-гранитовый; 11 – ранне-среднекарбоневая вулканогенно-осадочная гутайская свита; 12 – раннепалеозойский малханский комплекс гранитовый; 13 – раннепалеозойский джидинский комплекс диорит-плагиогранит-гранитовый; 14 – габбро-диоритовые массивы Унго-Хилокского ареала; 15 – рифейский малханский комплекс метаморфический; 16 – разрывные нарушения

Fig. 1. Geological map of the gabbro-diorite massifs of the Ungo-Khilok area [3]. 1 – Quaternary deposits; 2 – Doronin suite Early Cretaceous sedimentary-volcanogenic rocks; 3 – Doronin complex Early Cretaceous trachybasalt-trachyrhyolites; 4 – Yablonova complex Late Jurassic gneiss-granite-leucogranites; 5 – Kunalei complex Early Triassic alkaline granite-syenites; 6 – Tsagan-Khuntei suite Early Triassic volcanogenic-sedimentary rocks; 7 – Bichur complex Late Permian gabbro-monzonite-granites; 8 – Sogotinsky complex Late Permian monzonite-syenites; 9 – Tamir suite Late Permian sedimentary-volcanogenic rocks; 10 – Vitimkan complex Middle-Late Carboniferous syenite-granites; 11 – Gutai suite Early-Middle Carboniferous volcanogenic-sedimentary rocks; 12 – Malkhan complex Early Paleozoic granitoids; 13 – Dzhida complex Early Paleozoic diorite-plagiogranite-granites; 14 – gabbro-diorite massifs of the Ungo-Khilok area; 15 – Malkhan complex Riphean metamorphic rocks; 16 – faults

Петро- и геохимическая характеристика пород

На классификационной диаграмме TAS [10] составы пород Хасуртайского и Хорульского массивов варьируют от габброидов до диоритов, охватывая диапазон кремнекислотности от 38 до 61 мас. % SiO_2 , при щелочности, соответствующей субщелочному полю (рис. 3). Содержания щелочей в породах Хасуртайского и Хорульского массивов имеют довольно широкий разброс значений по Na_2O (1–5,44 мас. %) и по K_2O (0,06–4,53 мас. %). По отношениям окислов Na и K породы принадлежат к калинатровой и калиевой сериям. По коэффициенту глиноземистости ($al' = \text{Al}_2\text{O}_3 / (\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3)$) породы Хасуртайского и Хорульского массивов относятся к умеренноглиноземистым (0,55–0,97), часть к высокоглиноземистым породам ($al' = 1,1$ –2,73). Значения коэффициента магнезиальности (K_{mg}) уменьшается от габбро (87,82) до монцодиоритов (46,75).

Распределение содержаний некоторых индикаторных элементов (Cr, Ni, Sr, Ba и Zr) коррелируется

с магнезиальностью пород. Наиболее жесткую положительную связь имеют когерентные элементы Ni, Cr, отражающие фракционную кристаллизацию магмы в промежуточной камере, тогда как несовместимые – Sr, Ba и Zr, напротив, обнаруживают менее выраженную отрицательную корреляцию.

Спектры распределения РЗЭ в рассматриваемых образованиях в целом сходны (рис. 4, а). Для них характерно умеренное обогащение легкими лантаноидами относительно тяжелых, в большинстве случаев отсутствует Eu аномалия ($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0,23$ –0,40). Сумма РЗЭ в породах составляет примерно 15 г/т, в оливновом габбро – до 106 г/т в диоритах. Отношение $(\text{La}/\text{Yb})_n$ как мера обогащения легкими РЗЭ относительно тяжелых РЗЭ составляет 2,48–19,1.

Мультиэлементные спектры также обнаруживают явное сходство (рис. 4, б): породы в разной степени обогащены Cs, Rb, Ba, Th, U и слабо деплетированы Zr, Hf, Ti, при этом ярко выражена отрицательная Nb-Ta и положительная Pb аномалии.

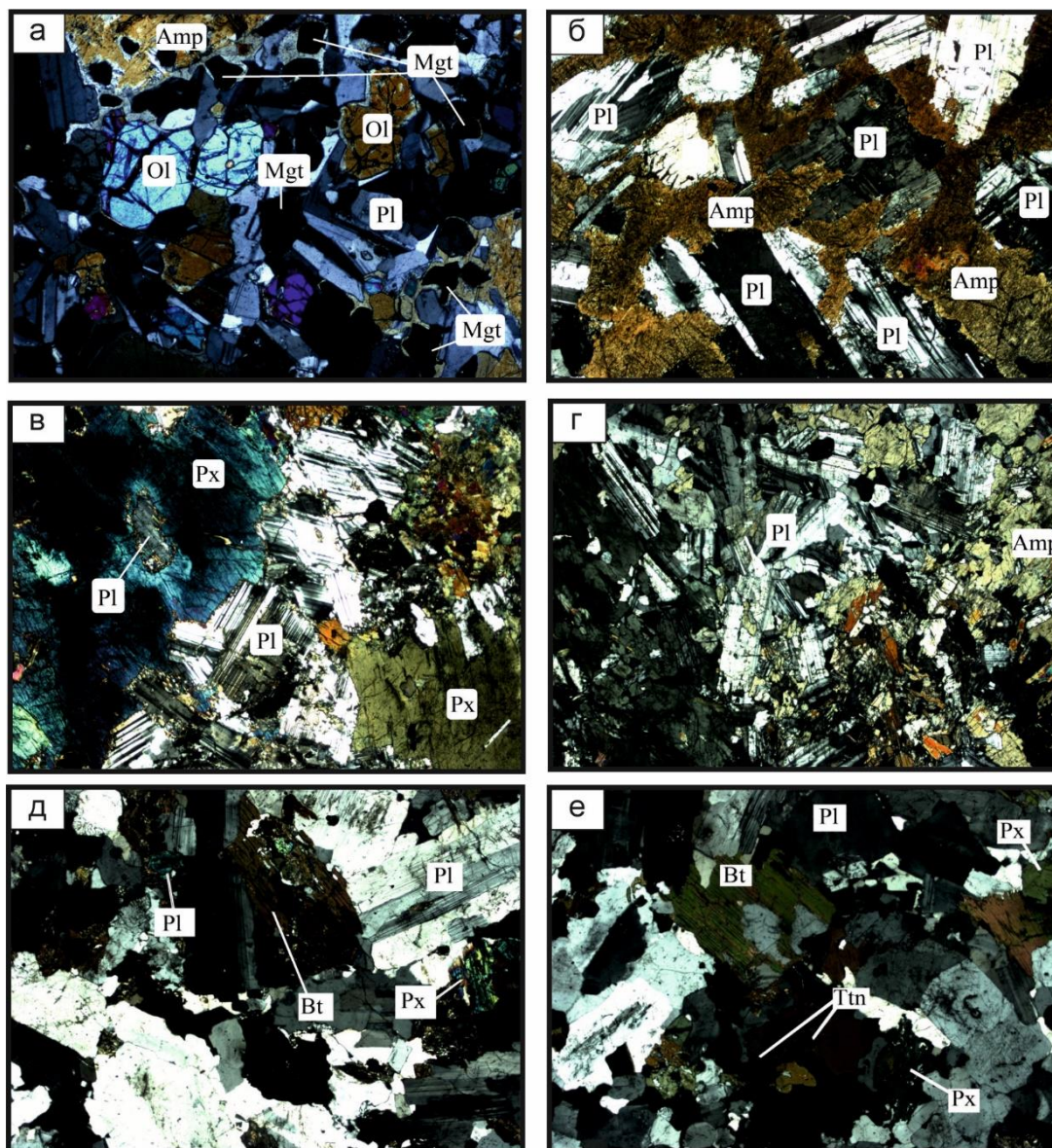


Рис. 2. Микрофотографии оливинового габбро (а), габбро (б), габбронорита (в), анортозита (г), монцодиорита (д) и диорита (е). Ol – оливин, Pl – плагиоклаз, Px – пироксен, Amp – магнезиальная роговая обманка, Mgt – магнетит, Bt – биотит, Ttn – титанит

Fig. 2. Photomicrographs of olivine gabbro (a), gabbro (б), gabbro-norite (в), anorthosite (г), monzodiorite (д) and diorite (е) in cross-polarized light. Mineral abbreviations: Ol – olivine, Pl – plagioclase, Px – pyroxene, Amp – magnesian hornblende, Mgt – magnetite, Bt – biotite, Ttn – titanite

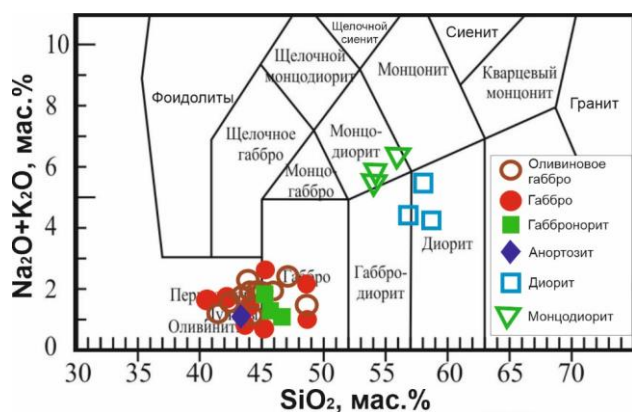


Рис. 3. Классификационные диаграммы $\text{SiO}_2-(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$ [10] для основных и средних пород Унго-Хилокского ареала

Fig. 3. Classification diagrams $\text{SiO}_2-(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$ [10] for rocks of the Ungo-Khilok area

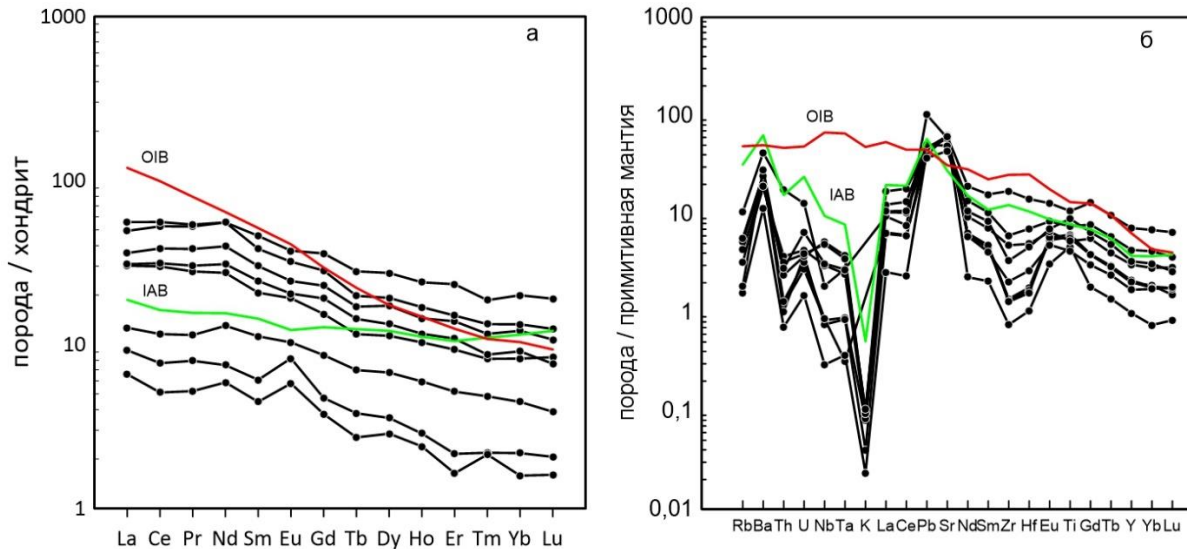


Рис. 4. Спектры распределения редкоземельных элементов, нормализованные к хондриту (а), и мультиэлементные спектры, нормализованные к составу примитивной мантии (б) для основных и средних пород Унго-Хилокского ареала. Хлорид и состав примитивной мантии взяты в [11], красные линии показывают спектры для океанических островных базальтов [11], зеленая линия показывает распределение для островных дуговых базальтов Центрально-Камчатского разлома [12]

Fig. 4. Rare earth elements distributions normalized for chondrite composition (a), and multielement spectra normalized for primitive mantle composition (b) for rocks of the Ungo-Khilok area. Chondrite and primitive mantle compositions are from [11], red lines show spectra for oceanic islands basalt (OIB) from [11], green line show distributions for island arc basalts (IAB) of the Central Kamchatka depression from [12]

Результаты U-Pb изотопного датирования

Цирконы для изотопно-геохронологических исследований были выделены из габбро (пр. У-13-51). Католюминесцентные изображения (рис. 5) показывают наличие тонкой магматической зональности, параллельной кристаллографическим ограничениям, и отсутствие ксеногенных ядер в цирконах, что указывает на их магматическое происхождение.

Содержание U в цирконах варьирует от 183 до 236 мг/г, в соответствии с этим Th/U составляет 0,9–1,2, что не выходит за пределы, характерные для цирконов магматического генезиса. Аналитические точки конкордантны в пределах эллипса ошибок. Конкордантный возраст по восьми точкам составляет 337 ± 3 млн лет (рис. 5), MSWD=2,2.

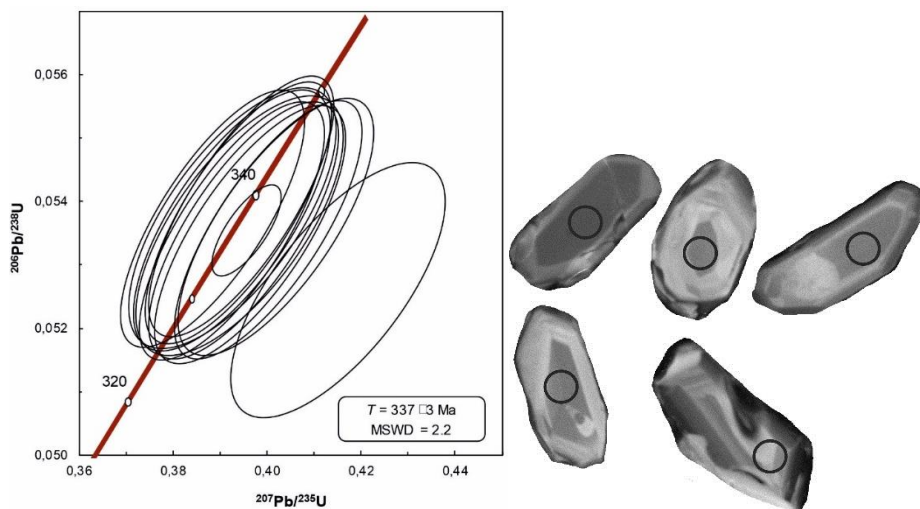


Рис. 5. Католюминесцентные изображения кристаллов циркона из пр. У-13-51 с указанием точек определения U-Pb-отношений и соответствующая диаграмма с конкордией

Fig. 5. Cathodoluminescence images of zircons from sample U-13-51 with marked sites of U-Pb ratio measurements and corresponding concordia diagram

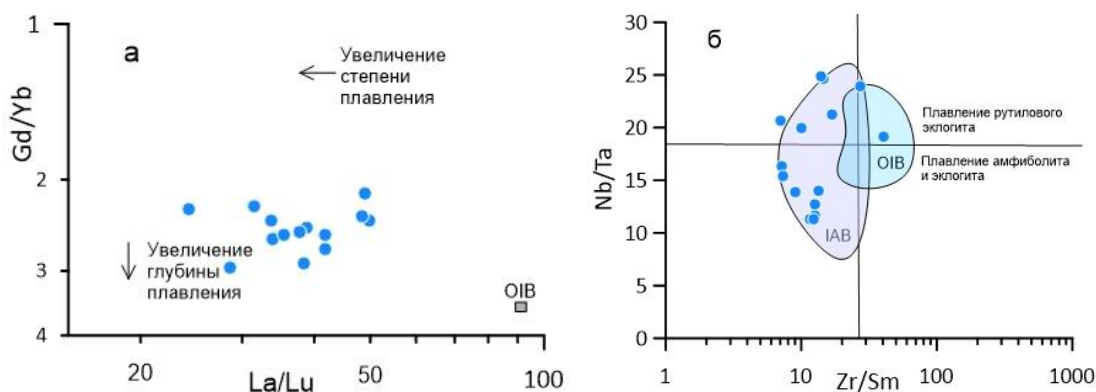


Рис. 6. Соотношение HFS-элементов в породах Усть-Хилокского ареала: а) $Gd/Yb-La/Lu$ [14]; б) $Nb/Ta-Zr/Sm$ [15] (пояснение – в тексте)
Fig. 6. Variations of HFS-elements in the rocks of the Ungo-Khilok area: а) $Gd/Yb-La/Lu$ [14]; б) $Nb/Ta-Zr/Sm$ [15] (see text for explanation)

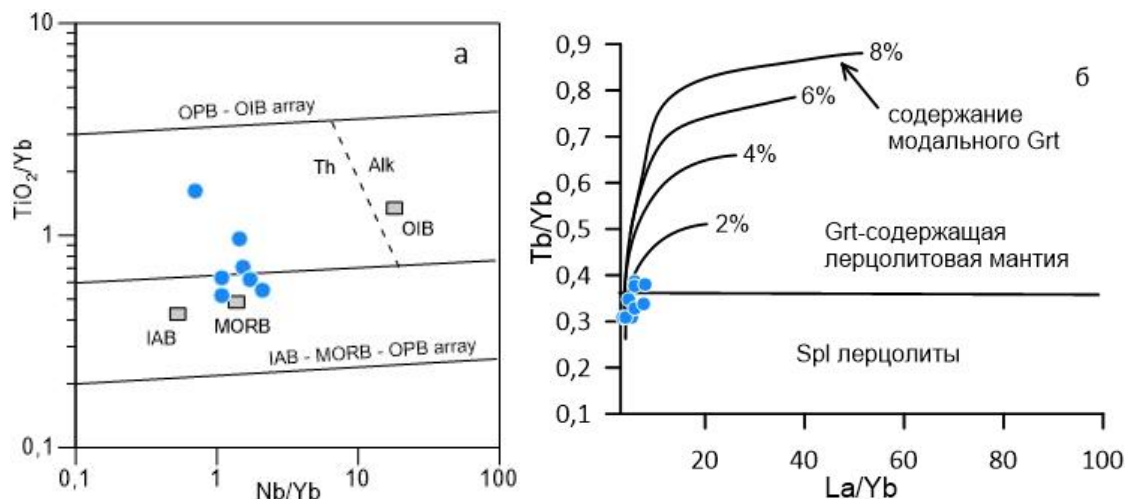


Рис. 7. Положение фигуративных точек составов пород массивов на дискриминационных диаграммах: (а) $Nb/Yb-TiO_2/Yb$, состав OIB, IAB, MORB по [19] и (б) $La/Yb-Tb/Yb$, изолинии содержания граната в фертильной лерцолитовой мантии по [20], Gr – гранат, Sp – шпинель
Fig. 7. Position of the compositional points of the rocks on the discrimination diagrams: (а) $Nb/Yb-TiO_2/Yb$, состав OIB, IAB, MORB data after [19] and (б) $La/Yb-Tb/Yb$, isolines of garnet content in the fertile lherzolitic mantle after [20], Grt – garnet, Sp – spinel

Обсуждение результатов

Изотопно-геохронологические данные позволяют выделить габбро-диоритовые массивы в отдельный временной промежуток, соответствующий позднему палеозою. Массивы карбонового возраста не сопровождаются какими-либо другими интрузивными комплексами и залегают среди мезозойских интрузивных пород кислого состава [13].

Изученные изверженные породы принадлежат к калий-натровой серии субщелочного габбро-диоритового ряда. Содержание петрогенных и многих рассеянных элементов в породах не противоречит фракционной кристаллизации по модели Н. Боуэна.

В процессе фракционно-кристаллизационной дифференциации происходит смена высокотемпературных минеральных парагенезисов на низкотем-

пературные. Особенности составов пород, а также широкие вариации содержания глинозема, кальция и магния в породах габбро-диоритового ряда обусловлены фракционированием оливина, клинопироксена и плагиоклаза при кристаллизации высокоглиноземистого базальта в промежуточной магматической камере. В породах массива наблюдаются высокие концентрации Ba, Sr, и Zr, что свойственно для пород внутримантийного типа.

Распределение редких элементов в породах габбро-диоритовых пород Унго-Хилокского ареала может отражать неоднородность вещества магматических источников. Породы обладают отчетливыми геохимическими признаками участия в источнике их расплава вещества IAB (рис. 6, б). По сравнению с OIB породы массивов имеют пони-

женные значения Gd/Yb и La/Lu, что соответствует меньшей глубине генерации магмы и более высокой степени плавления протолита (рис. 6, а).

Содержания высоkozарядных элементов в породах массивов являются переходными между составами OIB и IAB (рис. 7, а). Такое сочетание вероятно при смешении компонентов мантийного плюма и островной дуги [16–18]. Обогащенность пород легкими лантаноидами относительно тяжелых ((La/Yb)_n=2,48–19,13) предполагает выплавление мафической магмы из гранатсодержащего мантийного протолита (рис. 7, б).

Выводы

Получены изотопно-геохронологические данные, позволяющие определить время и место основного магматизма в данном регионе. Установлен возраст габбро Хасуртайского массива Унго-Хилокского ареала, составляющий 337 ± 3 млн лет.

Плюм-литосферное взаимодействие могло привести к унаследованию геохимических признаков более ранних субдукционных комплексов Монголо-Охотского океана, а также к возрастанию роли обогащенной мантии в магмогенезе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Геологическая карта юга Восточной Сибири и северной части МНР. М-б 1:1500000 / под ред. А.Л. Яншина. – Л.: Ленинградская картфабрика ВСЕГЕИ, 1981. – 4 л.
2. Gordienko I.V. The role of island-arc oceanic, collisional and intraplate magmatism in the formation of continental crust in the Mongolia-Tranbaikalia region: geostructural, geochronological and Sm-Nd isotope data // *Geodynamics & Tectonophysics*. – 2021. – Vol. 12. – № 1. – P. 1–47. DOI: 10.5800/GT-2021-12-1-0510.
3. Гордиенко И.В. Неопротерозой-палеозойский магматизм и геодинамика Центрально-Азиатского складчатого пояса. – Новосибирск: СО РАН, 2023. – 345 с.
4. Государственная геологическая карта Российской Федерации. М-б 1:1000000 (третье поколение). Серия Алдано-Забайкальская. Лист М-49 – Петровск-Забайкальский. Объяснительная записка / С.Н. Пехтерев, Е.В. Нечепав, Н.А. Артамонова, М.А. Вологдин, А.А. Духовский, Ф.И. Еникеев, С.В. Кожунова, О.Н. Круткина, Т.А. Ступина, М.Е. Четвериков, Г.М. Шор. – СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2012. – 438 с.
5. Богатиков О.А. Петрология и металлогения габбро-сиенитовых комплексов Алтае-Саянской области. – М.: Наука, 1966. – 240 с.
6. Nomenclature of amphiboles: report of the Subcommittee on amphiboles of the International Mineralogical Association, Commission on new minerals and mineral names / B.E. Leake, A.R. Wooley, C.E.S. Alps, W.D. Birch, M.C. Gilbert, J.D. Grice, F.C. Hawthorne, A. Kato, H.J. Kish, V.G. Krivovichev, K. Linthout, K. Laird, J.A. Mandarino, W.V. Maresch, E.H. Nickel, N.M.S. Rock, J.C. Schumacher, D.C. Smith, N.C.N. Stephenson, L. Ungretti, E.J.W. Whittaker, G. Youzhi // *Canadian Mineralogist*. – 1997. – Vol. 35. – P. 219–246.
7. Whitney D.L., Evans B.W. Abbreviations for names of rock-forming minerals // *American Mineralogist*. – 2010. – Vol. 95. – P. 185–187.
8. The application of laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry to in situ U–Pb zircon geochronology / S.E. Jackson, N.J. Pearson, W.L. Griffin, E.A. Belousova // *Chemical Geology*. – 2004. – Vol. 211. – P. 47–69.
9. Plesovice zircon – a new natural reference material for U–Pb and Hf isotopic microanalysis / J. Slama, J. Kosler, D.J. Condon, J.L. Crowley, A. Gerdes, J.M. Hanchar, M.S.A. Horstwood, G.A. Morris, L. Nasdala, N. Norberg, U. Schaltegger, B. Schoene, M.N. Tubrett, M.J. Whitehouse // *Chemical Geology*. – 2008. – Vol. 249. – № 1–2. – P. 1–35.
10. Middlemost E.A.K. Naming materials in the magma/igneous rock system // *Earth Science Reviews*. – 1994. – Vol. 37. – P. 215–224.
11. Sun S.-S., McDonough W.F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. – L.: Geological Society, Special Publications, 1989. – Vol. 42. – P. 313–345.
12. Churikova T., Dorendorf F., Wörner G. Sources and fluids in the mantle wedge below Kamchatka, evidence from across-arc geochemical variation // *Journal of Petrology*. – 2001. – Vol. 42 (8). – P. 1567–1593.
13. Антонов А.Ю., Травин А.В. К вопросу о масштабах палеозойского и мезозойского гранитоидного магматизма и состава его продуктов в пределах Хилок-Витимского складчатого пояса Центрального Забайкалья // *Тихоокеанская геология*. – 2016. – Т. 35. – № 2. – С. 29–48.
14. Variation in parental magmas of Mt Rouse, a complex polymagmatic monogenetic volcano in the basaltic intraplate Newer Volcanics Province, southeast Australia / J.A. Boyce, I.A. Nicholls, R.R. Keays, P.C. Hayman // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. – 2015. – Vol. 169 (11).
15. Foley S., Tiepolo M., Vannucci R. Growth of early continental crust controlled by melting of amphibolite in subduction zones // *Nature*. – 2002. – Vol. 417. – P. 837–840.
16. Врублевский В.В., Гертнер Г.А. Палеозойские щелочно-мафитовые интрузии Кузнецкого Алатау, их источники и условия образования расплавов // *Петрология*. – 2021. – Т. 29. – № 1. – С. 31–63.
17. Late Mesozoic and Cenozoic volcanism of the East Sikhote-Alin area (Russian Far East): a new synthesis of geological and petrological data / Y.F. Martynov, A.I. Khanchuk, A.V. Grebennikov, A.A. Chashchin, V.K. Popov // *Gondwana research*. – 2017. – Vol. 47. – P. 358–371.
18. Гордиенко И.В. Связь субдукционного и плюмового магматизма на активных границах литосферных плит в зоне взаимодействия Сибирского континента и Палеоазиатского океана в неопротерозое и палеозое // *Геодинамика и тектонофизика*. – 2019. – Т. 10. – № 2. – С. 405–457.
19. LIP printing: use of immobile element proxies to characterize Large Igneous Provinces in the geologic record / J.A. Pearce, R.E. Ernst, D.W. Peate, C. Rogers // *Lithos*. – 2021. – Vol. 392. – 106068 p.
20. Plume-lithosphere interactions in the generation of the basalts of the Kenya rift, East Africa / R. Macdonald, N.W. Rogers, J.G. Fitton, S. Black, M. Smith // *Journal of Petrology*. – 2001. – Vol. 42. – № 5. – P. 877–900.

Информация об авторах

Роза Александровна Бадмацыренова, кандидат геолого-минералогических наук, ведущий инженер лаборатории геохимии рудообразования и геохимических методов поисков, Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, Россия, 664033, г. Иркутск, ул. Фаворского, 1А; старший научный сотрудник департамента рудной геологии, Институт «Сибирская школа геонаук», Иркутский национальный исследовательский технический университет, Россия, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83; roza1977@mail.ru. <https://orcid.org/0000-0002-4010-7190>

Ярослав Юрьевич Шелепов, младший научный сотрудник лаборатории петрологии и рудоносности магматических формаций, Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3; shelepov@igm.nsc.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3447-9411>

Поступила в редакцию: 01.07.2024

Поступила после рецензирования: 10.09.2024

Принята к публикации: 06.05.2025

REFERENCES

1. Yanshin A.L. *Geological map of the South of Eastern Siberia and the Northern part of the MPR. Scale 1:1500000*. Leningrad, Kartfabrika Vserossiyskogo nauchno-issledovatel'skogo geologicheskogo instituta Publ., 1980. (In Russ.)
2. Gordienko I.V. The role of island-arc oceanic, collisional and intraplate magmatism in the formation of continental crust in the Mongolia-Transbaikalia region: geostructural, geochronological and Sm-Nd isotope data. *Geodynamics & Tectonophysics*, 2021, vol. 12, no. 1, pp. 1–47. DOI: 10.5800/GT-2021-12-1-0510.
3. Gordienko I.V. *Neoproterozoic-Paleozoic magmatism and geodynamic of the Central-Asian Foldbelt*. Novosibirsk, SB RAS Publ., 2023. 345 p. (In Russ.)
4. Pekhterev S.N., Nechepaev E.V., Artamonova N.A., Vologdin M.A., Dukhovskiy A.A., Enikeev F.I., Kozhunova S.V., Krutkina O.N., Stupina T.A., Chetverikov M.E., Shor G.M. *State Geological Map of the Russian Federation. Scale 1:1000000 (3rd generation)*. Series Aldan-Transbaikalian. Sheet M-49. Explanatory Note. St. Petersburg, VSEGEI, 2012. (In Russ.)
5. Bogatkov O.A. *Petrology and Metallogeny of Gabbro-Syenite Complexes in the Altai-Sayan Area*. Moscow, Nauka Publ., 1966. 240 p. (In Russ.)
6. Leake B.E., Wooley A.R., Alps C.E.S., Birch W.D., Gilbert M.C., Grice J.D., Hawthorne F.C., Kato A., Kish H.J., Krivovichev V.G., Linthout K., Laird K., Mandarino J.A., Maresch W.V., Nickel E.H., Rock N.M.S., Schumacher J.C., Smith D.C., Stephenson N.C.N., Ungretti L., Whittaker E.J.W., Youzhi G. Nomenclature of amphiboles: report of the Subcommittee on amphiboles of the International Mineralogical Association, Commission on new minerals and mineral names. *Canadian Mineralogist*, 1997, vol. 35, pp. 219–246.
7. Whitney D.L., Evans B.W. Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American Mineralogist*, 2010, vol. 95, pp. 185–187.
8. Jackson S.E., Pearson N.J., Griffin W.L., Belousova E.A. The Application of Laser Ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry to in situ U–Pb zircon geochronology. *Chemical Geology*, 2004, vol. 211, pp. 47–69.
9. Slama J., Kosler J., Condon D.J., Crowley J.L., Gerdes A., Hanchar J.M., Horstwood M.S.A., Morris G.A., Nasdala L., Norberg N., Schaltegger U., Schoene B., Tubrett M.N., Whitehouse M.J. Plesovice zircon – a new natural reference material for U–Pb and Hf isotopic microanalysis. *Chemical Geology*, 2008, vol. 249, no. 1–2, pp. 1–35.
10. Middlemost E.A.K. Naming materials in the magma/igneous rock system. *Earth Science Reviews*, 1994, vol. 37, pp. 215–224.
11. Sun S.-S., McDonough W.F. *Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes*. London, Geological Society, Special Publications, 1989. Vol. 42, pp. 313–345.
12. Churikova T., Dorendorf F., Wörner G. Sources and fluids in the mantle wedge below Kamchatka, evidence from across-arc geochemical variation. *Journal of Petrology*, 2001, vol. 42, no. 8, pp. 1567–1593.
13. Antonov A.Y., Travin A.V. On the problem of the scale and composition of Paleozoic and Mesozoic granitoid magmatism in the Khilok–Vitim Fold belt of Central Transbaikalia. *Russian Journal of Pacific Geology*, 2016, vol. 10, no. 2, pp. 105–122.
14. Boyce J.A., Nicholls I.A., Keays R.R., Hayman P.C. Variation in parental magmas of Mt Rouse, a complex polymagmatic monogenetic volcano in the basaltic intraplate Newer Volcanics Province, southeast Australia. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2015, vol. 169 (11).
15. Foley S., Tiepolo M., Vannucci R. Growth of early continental crust controlled by melting of amphibolite in subduction zones. *Nature*, 2002, vol. 417, pp. 837–840.
16. Vrublevskii V.V., Gertner I.F. Paleozoic alkaline-mafic intrusions of the Kuznetsk Alatau, their sources and conditions for magma generation. *Petrology*, 2021, vol. 29, no. 1, pp. 24–53.
17. Martynov Y.F., Khanchuk A.I., Grebennikov A.V., Chashchin A.A., Popov V.K. Late Mesozoic and Cenozoic volcanism of the East Sikhote-Alin area (Russian Far East): a new synthesis of geological and petrological data. *Gondwana research*, 2017, vol. 47, pp. 358–371.
18. Gordienko I.V. Relationship between subduction-related and plume magmatism at the active boundaries of lithospheric plates in the interaction zone of the Siberian continent and Paleoasian ocean in the Neoproterozoic and Paleozoic. *Geodyn. Tectonophysics*, 2019, vol. 10, no. 2, pp. 405–457. (In Russ.)
19. Pearce J.A., Ernst R.E., Peate D.W., Rogers C. LIP printing: use of immobile element proxies to characterize Large Igneous Provinces in the geologic record. *Lithos*, 2021, vol. 392, pp. 106068.
20. Macdonald R., Rogers N.W., Fitton J.G., Black S., Smith M. Plume-lithosphere interactions in the generation of the basalts of the Kenya rift, East Africa. *Journal of Petrology*, 2001, vol. 42, no. 5, pp. 877–900.

Information about the authors

Roza A. Badmatsyrenova, Cand. Sc., Lead Engineer, A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS, 1A, Favorskiy street, Irkutsk, 650033, Russian Federation; Senior Researcher, Irkutsk National Research Technical University, 83, Lermontov street, Irkutsk, 664074, Russian Federation. roza1977@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4010-7190>

Yaroslav Yu. Shelepov, Junior Researcher, V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, 3, Akademik Koptug avenue, Novosibirsk, 630090, Russian Federation; shelepov@igm.nsc.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3447-9411>

Received: 01.07.2024

Revised: 10.09.2024

Accepted: 06.05.2025

УДК 622.243.2
DOI: 10.18799/24131830/2025/7/4780
Шифр специальности ВАК: 2.8.1
Обзорная статья

Обоснование и разработка отклонителя непрерывного действия с полным отбором керна для бурения геологоразведочных скважин

П.А. Блинов, Н.М. Силичев✉, В.В. Никишин, В.Г. Гореликов

Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Россия, г. Санкт-Петербург

✉ nikita1silichev@gmail.com

Аннотация. Актуальность. Разведка новых месторождений минерального сырья связана с большими затратами на проведение геологоразведочных работ. Основным способом получения информации о количестве полезных компонентов на месторождениях твердых полезных ископаемых остается бурение разведочных скважин с отбором керна. Следовательно, наиболее перспективным путем снижения затрат является сокращение объемов бурения по вышележащим нерудным горным породам. Снижение этих затрат может быть достигнуто путем оптимизации разведочных сетей направленными и многоствольными скважинами с использованием отклонителей непрерывного действия. **Цель.** Провести анализ основных преимуществ многоствольного и направленного бурения, а также выявить факторы, ограничивающие их широкое внедрение в геологоразведочную практику. Систематизировать данные о существующих технических решениях в области направленного бурения, оценив их эффективность и ключевые недостатки. Сформулировать комплекс требований к проектированию отклонителя непрерывного действия, ориентированного на повышение точности и производительности геологоразведочного бурения. **Методы.** Твердотельное моделирование, математическое моделирование. **Результаты и выводы.** Определены основные требования для успешной работы отклонителя непрерывного действия в скважине. Эффективной технологией для более широкого внедрения многоствольного бурения при разведке месторождения твердых полезных ископаемых является создание отклонителя непрерывного действия для бурения с отбором керна на интервалах искривления. Представлена конструкция разрабатываемого устройства. В рамках статьи более подробно рассмотрен искривляющий узел, реализующий механизм искривления, подобный тем, что используются в роторных управляемых системах «point the bit» – изгиб полого ведущего вала внутри эксцентриковых колец. Максимальная интенсивность искривления, которой можно добиться путем изгиба ведущего вала, ограничена предельно допустимой нагрузкой на резьбовые соединения бурильных труб типоразмера N.

Ключевые слова: разведочное бурение, направленное бурение, искусственное искривление скважин, снаряд со съемным керноприёмником, многоствольные скважины

Для цитирования: Обоснование и разработка отклонителя непрерывного действия с полным отбором керна для бурения геологоразведочных скважин / П.А. Блинов, Н.М. Силичев, В.В. Никишин, В.Г. Гореликов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 7. – С. 17–28. DOI: 10.18799/24131830/2025/7/4780

UDC 622.243.2
DOI: 10.18799/24131830/2025/7/4780
Review article

Justification and development of a continuous deflector with full core sampling for drilling exploration wells

P.A. Blinov, N.M. Silichev✉, V.V. Nikishin, V.G. Gorelikov

Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation

✉ nikita1silichev@gmail.com

Abstract. Relevance. Exploration of new mineral deposits is associated with high costs of geological exploration works. The main way to obtain information on the concentration of mineral components in solid mineral deposits is still drilling exploration wells with coring. Consequently, the most promising way to decrease costs is to reduce drilling of overlying non-metallic rocks. This cost reduction can be achieved by optimizing exploration grids with directional and multilateral wells using continuous diverters. **Aim.** To analyze the main advantages of multilateral and directional drilling, as well as identify the factors limiting their widespread introduction into exploration practice. To systematize data on existing technical solutions in the field of directional drilling, assessing their efficiency and key drawbacks. To formulate a set of requirements to the design of a continuous deflector oriented to improve the accuracy and productivity of exploration drilling. **Methods.** Solid modeling, mathematical modeling. **Results and conclusions.** An effective technology for solving this problem is the creation of a continuous deflector for drilling with coring. The paper presents a device realizing the mechanism of curvature similar to those used in rotary steerable systems “point the bit” – bending of quill drive shaft inside eccentric rings. The authors defined the basic requirements for successful operation of a deflector in a well. As a result, they developed a new design of continuous deflector for drilling diameter N (76 mm) taking into account all the requirements put forward. In further research it is planned to develop a mathematical model of the drive shaft bending and to transfer from the bending value (eccentric bushing rotation) to the intensity of the borehole curvature.

Keywords: mineral exploration drilling, directional drilling, artificial borehole curvature, wireline core barrel, multilateral wells

For citation: Blinov P.A., Silichev N.M., Nikishin V.V., Gorelikov V.G. Justification and development of a continuous deflector with full core sampling for drilling exploration wells. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 7, pp. 17–28. DOI: 10.18799/24131830/2025/7/4780

Введение

Согласно данным, представленным в отчете UN Environment's Global Resources Outlook, добыча полезных ископаемых увеличилась более чем в три раза с 1970 г. Это включает в себя пятикратное увеличение использования неметаллических минералов и 45-процентное увеличение использования ископаемого топлива [1–3].

Большая часть разведанных и эксплуатируемых месторождений минерального сырья значительно выработана, растет дефицит перспективных площадей для изучения, а поиски новых все чаще связаны с большими глубинами [4–6].

Бурение является самой дорогостоящей частью проекта по разведке полезных ископаемых, поэтому важно определить оптимальное количество и пространственное положение скважин, чтобы получить максимум информации при минимально возможных затратах [7–9]. Увеличение глубин изучаемых месторождений кратно увеличивает денежные затраты, а разработка методов разведки месторождений позволяет их снизить, что является наиболее актуальной задачей геологоразведочного производства.

Основным способом получения информации о количестве полезных компонентов на месторождениях твердых полезных ископаемых остается бурение разведочных скважин с отбором керна. Следовательно, наиболее перспективным путем снижения затрат является сокращение объемов бурения по вышележащим нерудным горным породам.

В настоящее время в геологоразведочных работах вертикальные скважины используются в основном на этапах поиска и оценки горизонтально и субгоризонтально залегающих рудных тел. По мере увеличения плотности разведочной сети и более

детального изучения рудных тел с углом наклона более 10 градусов применяют наклонно-направленные скважины [10, 11]. Для отбора проб рудных тел, имеющих крутой угол падения, характерный для жильных золотоносных месторождений, расположенных на больших глубинах (свыше 1000 м), рекомендуется применять многоствольное бурение.

Программа разведки месторождений многоствольными скважинами, и особенно в сочетании с методами скважинной геофизики, является наиболее эффективным методом снижения объема буровых работ [12–14]. Успешность многоствольного бурения достигается за счет сокращения метража бурения и позволяет сократить количество монтажных и строительных работ.

Очевидно, что стоимость одного метра бурения многоствольной скважины будет выше в сравнении со стандартным методом бурения, но не менее важным параметром экономической эффективности многоствольного бурения являются решаемые задачи, к которым можно отнести:

1. Существенное ускорение процесса разведки, что сокращает время, необходимое для завершения проекта.
2. В отличие от разведки месторождений одноствольными скважинами, многоствольные скважины позволяют многократно пересечь рудные тела, особенно при работе с крутопадающими рудными залежами. Это увеличивает эффективность разведки и улучшает точность подсчета запасов полезных ископаемых на месторождении.
3. Проведение геологоразведочного бурения с ограниченной площадки или в случае, когда строительство буровых площадок затруднено,

при этом имеется возможность разбуривания сетки скважин любой плотности. Это дает гибкость в выборе расположения скважин и упрощает логистические задачи.

4. Однократное разбуривание верхней части геологического разреза, в котором возможны обвалы стенок скважины и поглощения промывочной жидкости. Основной ствол многоствольной скважины однократно пересекает зону со сложными горно-геологическими условиями, а дополнительные стволы бурят по полезному ископаемому.
5. Проведение геологоразведки одновременно с добычей, включая ведение взрывных работ. Это увеличивает эффективность использования ресурсов и позволяет сократить время на разведку.
6. Выявление закономерности естественного искривления ствола скважины для вывода его в проектную точку подсечения рудного тела.
7. Проведение работ при наличии особо охраняемых территорий.

Многоствольное бурение является перспективной технологией в геологоразведке на твердые полезные ископаемые и имеет ряд преимуществ в сравнении с одноствольным методом. Основной проблемой реализации программы многоствольного разведочного бурения является отсутствие эффективно работающего инструмента для искусственного искривления скважин. В свете современных тенденций встает вопрос о разработке методов и технологий геологоразведки, использующих инновационные подходы, аналогичные тем, которые реализуются в нефтяной отрасли. Этот сектор пережил настоящий «бум» новых технологий, в том числе наклонно-направленного, многоствольного и горизонтального бурения.

Анализ имеющихся методов

Значительное развитие технологии и техники многоствольного бурения получено в области строительства скважин для освоения месторождений углеводородов. Ввиду того, что нефтегазовые

скважины строятся и в дальнейшем приносят прибыль [15], широко развиваются различные инновационные технологии для искусственного искривления и более качественного контроля за траекторией скважин. Аппаратная часть этих технологий основана на использовании телеметрических каналов связи с высокоразвитыми компьютерными и навигационными системами. Техническая часть представлена винтовыми забойными двигателями (ВЗД), роторными управляемыми системами (РУС), гибкими элементами бурового инструмента и прочими новшествами [16–18]. Именно они позволяют строить направленные, многоствольные и горизонтальные скважины с высокой точностью.

Самой передовой технологией для искусственного искривления скважин (и контроля за их траекторией) являются РУС, в которых разрушение горной породы осуществляется вращением долота вместе с бурильной колонной, управление траекторией скважины осуществляется блоком отклонения, что обеспечивает точное управление траекторией скважины.

РУС делятся на две основные категории по способу набора кривизны:

1. Push the bit – фрезерование стенки скважины (рис. 1). К этому типу относятся системы «PowerDrive X5» – «Schlumberger», «AutoTrak G3 RCLS» – «Baker Hughes».

Фрезерование происходит за счет использования отклонителей, которые позволяют создавать давление на боковую поверхность долота в направлении, противоположном действию отклонителей [19]. При этом отклоняется вся РУС или большая её часть.

2. Point the bit – ассиметричное разрушение забоя. Путем перемещения ведущего вала внутри корпуса РУС или изменения его изгиба достигается перекося долота, что приводит к неравномерному разрушению забоя [20] (рис. 2) К этому типу относятся системы: «Geo-Pilot» – «Halliburton Sperry-sun», «PowerDrive Xceed» – «Schlumberger».

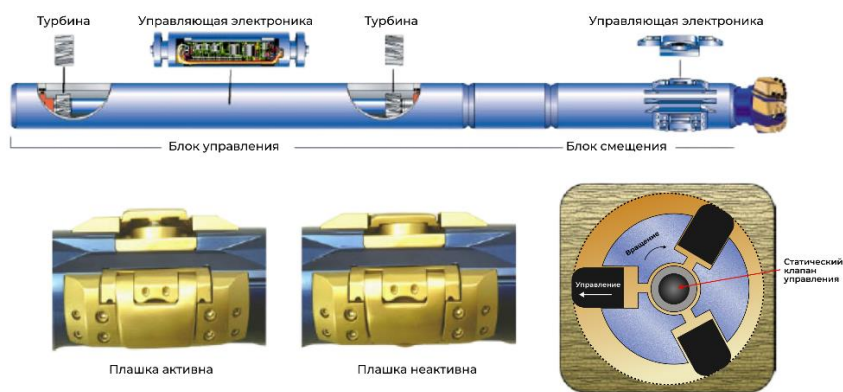


Рис. 1. Роторная управляемая система типа push the bit [18]

Fig. 1. Rotary steerable system (RSS) Push the bit type [18]

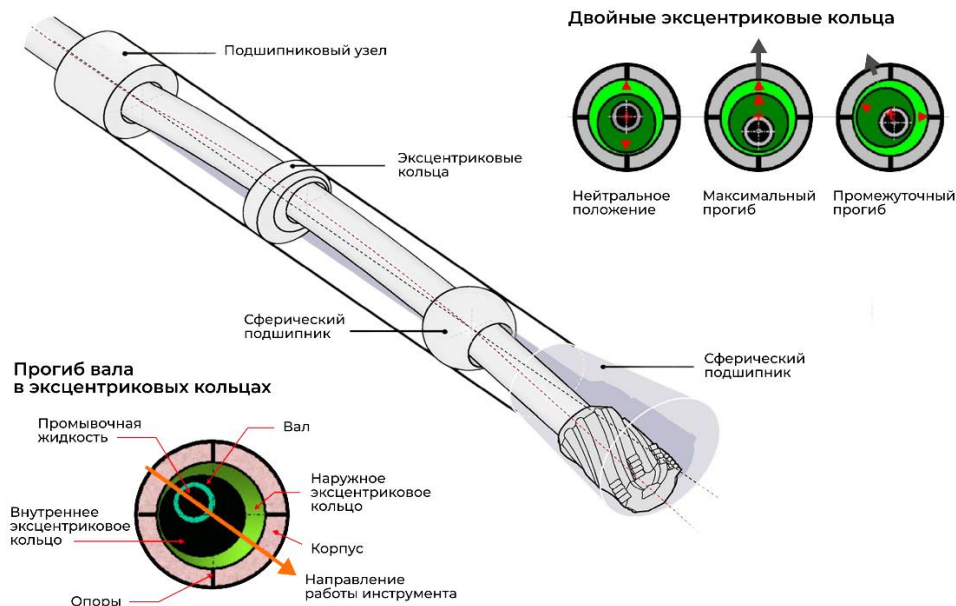


Рис. 2. Роторная управляемая система *point the bit* [18]

Fig. 2. *Point the bit* type RSS [18]

Использование технологии РУС при бурении скважин имеет несомненные преимущества. Она позволяет значительно увеличить механическую скорость бурения, повысить качество ствола при бурении направленных скважин и увеличить отклонение от вертикали в скважинах с горизонтальным окончанием.

Бурение геологоразведочных скважин обладает рядом специфических особенностей, которые ограничивают применение существующих методов из нефтегазовой отрасли. Одной из основных проблем является то, что большинство приборов и инструментов не соответствуют размерам скважин геологоразведочного номинала. Во вторую очередь работа в труднодоступных регионах, логистика в которые затруднена либо связана с большими затратами. Кроме того, существует еще одно препятствие – высокая стоимость услуг, предоставляемых специализированными компаниями при использовании новых технологий. Все эти особенности и сложности до сих пор не позволяли даже пробовать изменять технологии и методы проведения буровых работ, а также модернизировать приборную часть геологоразведочного производства. Важность устранения этих недостатков связана также с требованиями к отбору образцов керна как основного источника геологической информации для изучения структуры и условий залегания рудных месторождений [21]. Считается, что получение репрезентативного образца керна, отвечающего всем требованиям, является одной из главных задач геологоразведочных работ.

Частичное применение в геологоразведочном кернавом бурении нашли винтовые забойные дви-

гатели. Основной принцип работы ВЗД заключается в преобразовании гидравлической энергии бурового раствора в механическую энергию вращения вала двигателя [22].

Технология ВЗД, применительно к колонковому бурению на твердые полезные ископаемые, имеет ряд недостатков:

1. Бурение производится алмазным или шарошечным долотом (сплошным забоем) в интервалах искривления без отбора керна.
2. Ограниченная скорость механического бурения (не более 6 м/сут), вызванная как недостаточной частотой вращения для эффективной работы алмазного инструмента [23], так и тем, что при использовании долота площадь разрушения забоя в среднем в 2,5–3 раза больше, чем при использовании коронки. Это определяет необходимость большего крутящего момента и мощности, подаваемых на забой.
3. Большой расход промывочной жидкости, привлечение дополнительно насосного оборудования и персонала для обслуживания этой техники, что приводит к дополнительным финансовым затратам.
4. Необходимость в дополнительной очистке бурового раствора от шлама для обеспечения корректной работы забойного двигателя и нормального износа пары ротор–статор.
5. Необходимость дополнительного комплекта буровых труб (на один диаметр меньше) для установки над ВЗД. Количество труб определяется длиной интервала искривления во избежание обрыва буровой колонны в процессе искривления.

6. В конце цикла искривления забойным двигателем требуется проработка скважины до номинального диаметра.

Бурение с применением ВЗД позволяет решать задачи по бурению направленных и многоствольных скважин, снизить объем бурения и обеспечивает гарантию попадания в проектную точку до 95 %, но совокупность перечисленных факторов определяет недостаточную эффективность применения забойных двигателей в условиях геологоразведочных работ на твердые полезные ископаемые.

Клиновые отклонители остаются самым распространенным средством разведки месторождений минерального сырья направленными и многоствольными (в основном используются для возвращения к проектной траектории в случае ухода) скважинами.

Теоретически стационарные и извлекаемые (съемные) клиновые отклонители надежны и просты в работе. Однако на практике бурение наклонно-направленных скважин с применением стационарных и съемных клиньев является самым низкоэффективным методом за счет ряда ограничений. Например, при сильном естественном искривлении скважин необходимо большое количество постановок клиньев (до 10 шт. на 1000 м), вследствие чего происходит сильное удорожание себестоимости и резкое снижение производительности работ. Но стоит отметить, что данный метод будет весьма эффективным при бурении одноствольных направленных скважин в простых геологических условиях (близких к идеальным) глубиной не более 500 м.

Таким образом, обобщая недостатки используемых на производстве инструментов для искусственного искривления скважин, можно выдвинуть основные требования к отклонителям непрерывного действия:

1. Кондиционный выход керна с интервалов искусственного искривления скважины.
2. Интенсивность искривления скважины должна определяться не только целями бурения, но и прочностными характеристиками используемой (типовой) бурильной колонны.
3. Диаметр бурения при искривлении должен соответствовать проектному диаметру бурения, что исключает необходимость дополнительной калибровки ствола скважины.
4. Технология искривления не должна требовать специальных компоновок (жестких, шарнирных и т. д.) для сглаживания резких перегибов на участках набора угла.
5. Стабильная работа с использованием стандартных насосов, установленных на буровых установках.

Материалы и методы

Для успешного искусственного искривления скважины отклонителем непрерывного действия необходимо соблюдение следующих условий в конструкции устройства:

1. Предельную интенсивность искривления (минимальный радиус искривления) скважины необходимо проектировать с учетом изгибающей нагрузки на бурильные трубы. Любая часть отклонения не должна вызывать изгибающую нагрузку, превышающую прочность бурильной штанги.

Любое отклонение должно происходить на нескольких длинах штанг, и любая часть отклонения не должна вызывать изгибающую нагрузку, превышающую прочность элементов проходящей буровой штанги. Прочность каждой штанги в значительной степени зависит от ее положения в колонне, прилагаемых нагрузок при бурении и предыдущих деформаций. В конечном счете прочность любой буровой штанги определяется двумя механическими характеристиками материала: пределом упругого изгиба тела трубы и пределом усталости материала резьбового соединения.

Все стали подвержены усталостному разрушению (хрупкое растрескивание с быстрым последующим разрушением) при воздействии знакопеременной нагрузки в течение достаточного периода времени (предел усталости) [24, 25]. Рассмотрим, что при прохождении буровой штанги через отклонение она подвергается знакопеременной изгибающей нагрузке. При каждом повороте бурильной колонны в интервале искривления она подвергается растяжению через внешнюю часть изгиба и сжатию через внутреннюю.

Практика подтверждает, что материал не теряет целостности, если переменные нагрузки не превышают 50 % от предела текучести. Однако это справедливо только для стали, которая в остальное время не нагружена или находится под сжимающей предварительной нагрузкой. В процессе бурения бурильные трубы вблизи забоя всегда находятся под сжимающим усилием, а бурильные трубы вблизи устья подвергаются растяжению (особенно в условиях сухой скважины), что может снизить усталостную прочность до менее чем 25 % от предела текучести, в зависимости от величины растяжения (рис. 3).



Рис. 3. Предел выносливости [26]
Fig. 3. Fatigue strength [26]

Дальнейшее снижение усталостной прочности происходит в сечении наружной резьбы буровой трубы, где возникает дополнительное напряжение, вызванное моментом затяжки, требуемым в каждом резьбовом соединении [27]. Стоит отметить, что это снижение частично компенсируется при термообработке резьбовых соединений, повышающей прочность материала [28].

Таким образом, напряжения изгиба в колонне буровых труб не должны превышать предела выносливости материала в соответствии со следующим условием прочности (без учета запаса прочности):

$$\sigma_{из} = \frac{EI_0 i_n}{57,3W_0} \leq [\sigma_{-1}],$$

где $\sigma_{из}$ – напряжение изгиба, МПа; E – модуль Юнга, МПа; I_0 – осевой момент инерции поперечного сечения трубы по резьбе, м⁴; i_n – предельное значение интенсивности искривления, град/м; W_0 – осевой момент сопротивления поперечного сечения трубы по резьбе, м³; $[\sigma_{-1}]$ – предел выносливости на изгиб, МПа.

Результаты расчетного метода определения предельной интенсивности искривления подтверждаются производственной практикой и рекомендациями по эксплуатации ведущих производителей бурового оборудования. Так, компания «Boart Longyear» приводит руководство по максимальному допустимому искривлению ствола скважины для каждого типоразмера бурения, в соответствии с табл. 1.

Таблица 1. Максимальное искривление скважины [29]

Table 1. Maximum allowable wellbore curvature [29]

Типоразмер труб Rod size	Максимальное отклонение Maximum deviation	Радиус искривления, м Bend radius, m	Поперечная нагрузка, Н·м Lateral loading, N·m
BQ	1,2° на 3,0 м 1.2° in 3.0 m	69	738
NQ	1,0° на 3,0 м 1.0° in 3.0 m	87	1228
HQ	0,8° на 3,0 м 0.8° in 3.0 m	111	2359

Для предотвращения отказов буровой колонны необходимо устранять чрезмерное отклонение ствола скважины или ограничивать отклонения ствола скважины при планировании буровых работ.

Предельное значение искривления буровой колонны каждого типоразмера является ограничением в реализуемой отклонителем интенсивности искривления.

II. Длина и жесткость забойной компоновки искусственного искривления должна соответствовать проектному радиусу искривления.

Термин «вписываемость» определяет возможность спуска компоновки в скважину с искривлением без деформации. При продвижении отклоняющего устройства одновременно с искривлением ствола скважины габаритные размеры отклонителя определяют реализуемый им радиус искривления.

Размеры отклонителя должны соответствовать минимальному радиусу искривления для используемой буровой колонны. В противном случае максимальная реализуемая интенсивность искривления скважины снизится, а корпус устройства будет деформироваться и оказывать силовое воздействие на стенку скважины.

Так, при спуске отклонителя с породоразрушающим инструментом, диаметр которого равен диаметру ствола скважины, его предельную длину, согласно условию вписываемости, можно определить по формуле:

$$L = \sqrt{\frac{11,7(D_{скв} - D_n)}{i_{max}}} 57,3,$$

где L – предельная длина отклонителя, м; $D_{скв}$ – диаметр скважины, м; D_n – наружный диаметр отклонителя, м; i_{max} – максимально допустимая интенсивность искривления, град/м.

Задавшись поперечным размером отклонителя и диаметром бурения, можно определить предельный размер отклонителя. Например, для буровой колонны типоразмера N при сохранении диаметра бурения во время искривления (76 мм) и диаметре корпуса отклонителя 73 мм максимальная длина устройства не должна превышать 3,5 м.

III. Для искусственного искривления скважины необходимо обеспечить на забое либо фрезерование стенки скважины, либо перекося долота (коронки).

В конструкциях отклонителей используются две принципиальные схемы набора кривизны [30]:

1. Искривление скважин происходит благодаря воздействию отклоняющей силы на породоразрушающий инструмент, перпендикулярно его продольной оси. В результате этого непрерывно происходит фрезерование боковой стенки скважины в забойной зоне.
2. Бурение в заданном направлении обеспечивается перекосом снаряда или породоразрушающего инструмента. При этом происходит асимметричное разрушение забоя.

Устройства, работающие по первой схеме, имеют ряд значительных недостатков, ограничивающих их применение, а именно:

- на отклонитель помимо осевой нагрузки воздействует отклоняющая сила. Наличие последней

увеличивает момент трения между вращающейся и не вращающейся частями снаряда, что увеличивает дезориентирующий момент, как следствие, к узлу раскрепления отклонителя в стенке скважины необходимо предъявлять повышенные требования;

- отклонение скважин возможно только в породах сравнительно невысокой категории по буримости;
- необходимость в породоразрушающем инструменте с дополнительным или специальным боковым вооружением;
- набор кривизны скважины зависит от режимных параметров бурения, часто определяющих величину скорости фрезерования стенки скважины;
- скорость фрезерования обратно пропорциональна скорости бурения.

Указанные особенности в значительно меньшей степени характерны для снарядов, работающих по принципу асимметричного разрушения забоя. Но они также не лишены недостатков. Наиболее значимым является защемление породоразрушающего инструмента при перекосе – превышение размеров сечения долота в плоскости перпендикулярной оси скважины по сравнению с диаметром скважины [31].

Однако отклонители непрерывного действия второго типа обладают рядом преимуществ. Они менее нагружены и деформированы в процессе бурения, имеют простую конструкцию и демонстрируют достаточно высокую надежность в работе. Кроме того, они обладают возможностью плавного и контролируемого набора кривизны, поскольку не зависят от скорости фрезерования и скорости бурения.

Перечисленные особенности работы механизмов искривления обоих типов подтверждаются опытом использования роторных управляющих систем (рис. 4).

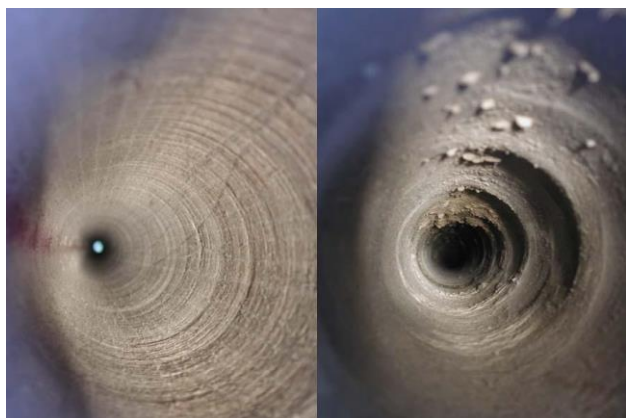


Рис. 4. Качество ствола скважины РУС point the bit (слева) и push the bit (справа) [32]

Fig. 4. Quality of point the bit wellbore (left) and push the bit (right) RSS [32]

Отмечается, что при использовании фрезерующего типа РУС (push the bit) возникают основные проблемы, связанные с качеством ствола скважины. В местах искривлений ствол характеризуется наличием уступов и ступенчатых форм, что при бурении в твердых горных породах может привести к аномальному износу бурильной колонны. Для данных РУС требуется особое боковое вооружение на долотах. При этом ресурс долот, фрезерующих стенку скважины, всегда меньше, чем у долот предназначенных для РУС (point the bit), которые формируют искривленный ствол за счет асимметричного разрушения забоя [33, 34]. При этом обратно пропорциональная зависимость интенсивности искривления от механической скорости бурения показывает, что рост производительности бурения находится в противоречии с тенденцией роста интенсивности искривления [35].

Таким образом, отклонители непрерывного действия второго типа менее нагружены и деформированы в процессе бурения, просты в конструкции и в работе достаточно надежны, а также отличаются возможностью плавного и контролируемого набора кривизны, т. к. отсутствует зависимость от скорости фрезерования и скорости бурения.

Результаты исследования и их обсуждение

Исходя из указанного, ясно, что для успешного геологоразведочного бурения требуется улучшение технологии направленного бурения, специально разработанной под оборудование и цели геологоразведки. Оно должно обеспечивать возможность отбора керна на искривленных интервалах, при этом интенсивность искривления не должна превышать допустимые значения, установленные для бурильной колонны. Важно, чтобы отклонитель функционировал без необходимости использования дополнительного оборудования, такого как наосы или дополнительные бурильные трубы.

В поисках решения данной проблемы появилась идея использования механизма искривления скважин, как и в роторных управляемых системах типа point the bit (искривление ведущего вала внутри эксцентриковых втулок, вызывающее изменение угла атаки вооружения породоразрушающего инструмента). Такая конструкция позволяет гибко изменять интенсивность искривления, а также появляется возможность выполнить ведущий вал полым для размещения в нем съемного керноприемника.

Предлагается отклонитель непрерывного действия с непрерывным отбором керна (рис. 5), включающий искривляющий узел – 1, выполненный в виде пары эксцентриковых втулок; полый ведущий вал – 2 (внутри располагается съемный керноприемник, соединенный с бурильной колон-

ной); узел фиксации – 3 корпуса отклонителя – 7 в стенки скважины посредством выдвижных плашек – 9; узел зацепления – 4 корпуса отклонителя и ведущего вала посредством подвижного фиксирующего штифта – 10; ориентирующий переводник – 5 и релитовый переводник – 6; 8 – установочный винт [Ошибка! Источник ссылки не найден.].

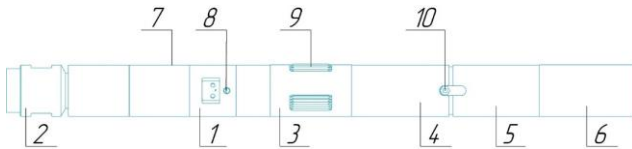


Рис. 5. Общий вид отклонителя непрерывного действия с отбором керна

Fig. 5. Schematic diagram of a continuous deflector with coring

Предложенный отклонитель разрабатывается для типоразмера бурения 76 мм (N), диаметр отбираемого керна равен 32 мм, что соизмеримо с керном, получаемым при бурении типоразмером 59 мм (B).

Отклонитель работает следующим образом. На поверхности с помощью узла искривления выставляется изгиб ведущего вала, соответствующий проектной интенсивности искривления. Устройство ориентируется по азимуту на поверхности и ориентированно спускается на забой (без поворота бурильной колонны). После постановки на забой включается буровой насос, под действием промывочной жидкости срабатывают узел зацепления и узел раскрепления в стенки скважины (корпус отклонителя зафиксирован в стенках скважины, вращение на него не передается). Происходит бурение с набором кривизны на длину керноприемной трубы (3 м), керноприемник поднимется с помощью лебедки и спускается пустой. Бурение продолжается до достижения проектного искривления.

Далее в статье более подробно рассмотрен механизм работы узла отклонения и методика расчета изгиба ведущего вала.

Узел искривления ведущего вала состоит из корпуса с эксцентричным отверстием, эксцентриковой втулки, втулки скольжения и фиксирующего болта (рис. 6).

Корпус узла искривления соединяется с корпусом отклонителя посредством резьбовых соединений. Таким образом, после активации узла раскрепления в скважине корпус узла искривления остается неподвижен, а изгиб ведущего вала зафиксирован в одной плоскости. Эксцентриковая втулка расположена в корпусе, ее поворот обеспечивает изгиб ведущего вала и, как следствие, перекося коронки на забое. Смещение осей отклонителя и ведущего вала при повороте втулки изменяется от 0 до 5 мм.

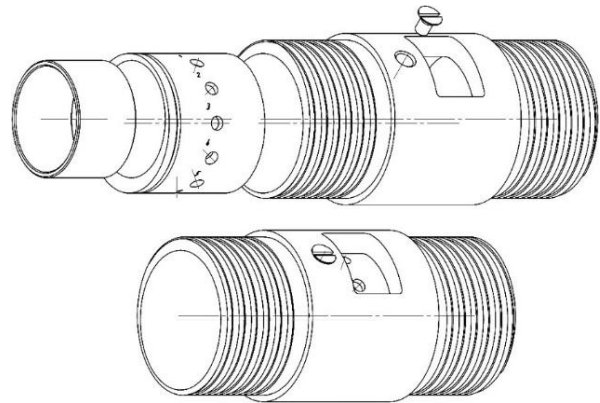


Рис. 6. Узел искривления ведущего вала в разборе (сверху) и в сборе (снизу)

Fig. 6. Drive shaft curvature assembly disassembled (top) and assembled (bottom)

Изменение положения втулки (7 положений) производится путем поворота втулки внутри корпуса узла искривления через специальное окошко в последнем, шаг поворота между положениями составляет 15 градусов. Фиксация эксцентриковой втулки обеспечивается стопорным винтом. Внутри эксцентриковой втулки расположена втулка скольжения, необходимая для предотвращения передачи вращения от ведущего вала на корпус узла искривления, а также на корпус отклонителя. Втулка скольжения может быть изготовлена из фторопласта, так как пара скольжения сталь–фторопласт обладает способностью работать без смазки с самым низким коэффициентом трения (0,02–0,03).

При повороте эксцентриковой втулки внутри корпуса центр внутреннего отверстия втулки описывает окружность вокруг центра корпуса узла искривления. Так как ведущий вал проходит через эксцентриковую втулку, смещение между ведущим валом и корпусом определяется расстоянием между этими центрами.

Смещение центров относительно наружной поверхности в корпусе и втулке составляет 2,5 мм. Таким образом, максимальное смещение ведущего вала составляет 5 мм (максимальный перекося коронки на забое), а минимальное смещение – 0 мм (перекося коронки отсутствует). Результаты промежуточных смещений представлены ниже и получены в виде зависимости от поворота эксцентриковой втулки (табл. 2).

$$y_B = f(\varphi) = -4 \cdot 10^{-7} \varphi^3 - 2 \cdot 10^{-5} \varphi^2 + 0,0444 \varphi,$$

где y_B – смещение оси ведущего вала в месте изгиба, мм; φ – угол поворота эксцентриковой втулки, град.

Плоскость изгиба ведущего вала, а как следствие, и направление набора кривизны, будут изменяться при разных положениях эксцентриковой втулки. Направления плоскости изгиба и соответствующие им смещения представлены на рис. 7.

Таблица 2. Смещение оси ведущего вала при повороте эксцентриковой втулки

Table 2. Drive shaft axis displacement when the eccentric bushing is rotated

Поворот эксцентриковой втулки φ , град Rotating the eccentric bushing φ , °	Смещение оси ведущего вала в месте изгиба u_b , мм Drive shaft axis displacement at the bending point, mm
0	0
30	1,29
60	2,50
90	3,54
120	4,33
150	4,83
180	5

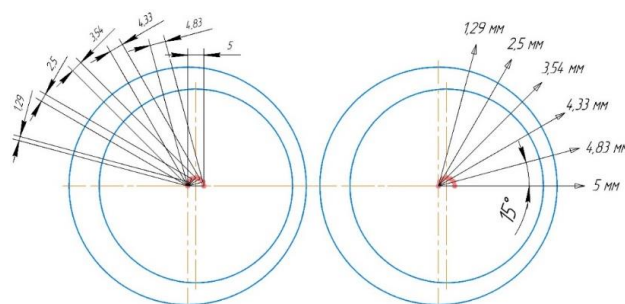


Рис. 7. Смещение плоскости изгиба при повороте эксцентриковой втулки

Fig. 7. Displacement of the bending plane when the eccentric bushing is rotated

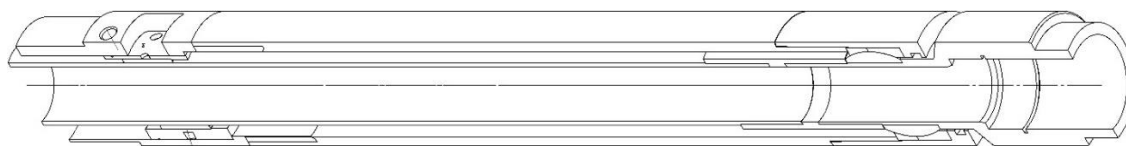


Рис. 8. Нижняя часть отклонителя

Fig. 8. Lower section of the deflector

Верхняя часть ведущего вала соединена с буровой колонной посредством резьбового соединения, нижняя часть ведущего вала проходит через сферический подшипник скольжения. Последний обеспечивает пересечение оси ведущего вала и корпуса отклонителя в нижней части и позволяет ведущему валу вращаться в фиксированной изгибом плоскости (рис. 8).

Заключение

Проведен анализ существующих технологий искусственного искривления скважин. Выявлены их недостатки, на основе которых определены требования к отклонителям непрерывного действия с учетом специфики геологоразведочных работ. Предложено адаптировать технологию искусствен-

ного искривления, реализуемую в роторных управляемых системах «point the bit», а именно изгиб ведущего вала внутри бурового снаряда. Полный ведущий вал позволяет разместить в нем съемный керноприемник, а система эксцентриковых колец – гибко настраивать интенсивность искривления.

Определены основные требования для успешного искусственного искривления скважины отклонителем непрерывного действия, которые необходимо учитывать при конструировании нового устройства.

В результате разработана новая конструкция отклонителя непрерывного действия для диаметра бурения N (76 мм) с учетом всех выдвинутых требований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Global resources outlook: 2019 / B. Oberle, S. Bringezu, S. Hatfield-Dodds, S. Hellweg, H. Schandl, J. Clement // International Resource Panel, United Nations Envio. – Paris, France, 2019. – 181 p.
2. Smimova E., Saychenko L. Hydrodynamic modeling and evaluation of partial substitution of cushion gas during creation of temporary underground gas storage in an aquifer // Hydrodynamic. International Journal of Engineering, Transactions A: Basics. – 2024. – Vol. 37. – № 7. – P. 1221–1230. DOI: 10.5829/ije.2024.37.07a.02.
3. Технология глушения газовых скважин на регулируемом давлении / М.В. Двойников, Я.Д. Минаев, В.В. Минибаев и др. // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 1. – С. 7–18. DOI: 10.18799/24131830/2024/1/4315.
4. Global guidelines and requirements for professional competencies of natural resource extraction engineers: implications for ESG principles and sustainable development goals / V. Litvinenko, I. Bowbrick, I. Naumov, Z. Zaitseva // Journal of Cleaner Production. – 2022. – Vol. 338. – P. 130–153. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130530.
5. Результаты комплексных экспериментальных исследований на станции Восток в Антарктиде / А.В. Большунов, Д.А. Васильев, А.Н. Дмитриев, С.А. Игнатьев, В.Г. Кадочников, Н.С. Крикун, Д.В. Сербин, В.С. Шадрин // Записки Горного института. – 2023. – Т. 263. – С. 724–741.
6. Fatehi M., Asadi Haroni H., Hossein Morshedy A. Designing infill directional drilling in mineral exploration by using particle swarm optimization algorithm // Arabian Journal of Geosciences. – 2017. – Vol. 10. – P. 1–14. DOI: 10.1007/s12517-017-3209-4.
7. Efficacy of information in mineral exploration drilling / J. Caers, C. Scheidt, Z. Yin, L. Wang, T. Mukerji, K. House // Natural Resources Research. – 2022. – Vol. 31. – № 3. – P. 1157–1173. DOI: 10.1007/s11053-022-10030-1.

8. Application of artificial neural networks for identification of lithofacies by processing of core drilling data / M. Yang, Y. Hu, B. Liu, L. Wang, Z. Zhou, M. Jia // *Applied Sciences*. – 2023. – Vol. 13. – № 21. – P. 119–134. DOI: 10.3390/app132111934.
9. Hossein-Morshedy A., Khorram F., Emery X. A multi-objective approach for optimizing the layout of additional boreholes in mineral exploration // *Minerals*. – 2023. – Vol. 13. – № 10. – P. 1252. DOI: 10.3390/min13101252.
10. Nwosu J. I., Egesi N. Predicting the true reserve of a steeply dipping deposit in a multi-deviation angle exploration operation // *Journal of Mining and Geology*. – 2021. – Vol. 57. – № 2. – P. 397–406.
11. Hapugoda S., Manuel J.R. A comparison of drilling and sampling techniques as they relate to base and precious metal exploration in the Mt Isa Inlier of North West Queensland and the Southern Lachlan Fold Belt in New South Wales // *Sampling conference: Proceedings Sampling 2010*. – Perth, 11–12 May 2010. – P. 2–14.
12. Томский К.О., Иванова М.С. Оптимизация расположения многозабойной скважины в тонкой нефтяной оторочке, осложненной наличием обширной газовой шапки // *Записки Горного института*. – 2024. – Т. 265. – С. 140–146.
13. Dvoynikov M.V., Nikitin V.I., Kopteva A.I. Analysis of the methodology for selecting the rheological model of cement slurry for determining the technological parameters of well casing // *International Journal of Engineering, Transactions A: Basics*. – 2024. – Vol. 37. – № 10. – P. 2042–2050. DOI: 10.5829/ije.2024.37.10a.15
14. Analysis of nucleation time of gas hydrates in presence of paraffin during mechanized oil production / G.Y. Korobov, A.A. Vorontsov, G.V. Buslaev, V.T. Nguyen // *International Journal of Engineering*. – 2024. – Vol. 37. – P. 1343–1356. DOI: 10.5829/ije.2024.37.07a.13.
15. Разработка и исследование тампонажных составов с улучшенными упруго-прочностными свойствами для крепления нефтяных и газовых скважин / П.А. Блинов, М.И. Садыков, В.Г. Гореликов, В.В. Никишин // *Записки Горного института*. – 2024. – Т. 268. – С. 588–598.
16. Zhang C., Zou W., Cheng N. Overview of rotary steerable system and its control methods // *2016 IEEE international conference on mechatronics and automation*. – 2016. – P. 1559–1565. DOI: 10.1109/ICMA.2016.7558796.
17. Жданев О.В., Зайцев А.В., Продан Т.Т. О возможностях создания российской высокотехнологичной компоновки низа бурильной колонны // *Записки Горного института*. – 2021. – Т. 252. – С. 872–884. DOI: 10.31897/PMI.2021.6.9
18. Ma T., Chen P., Zhao J. Overview on vertical and directional drilling technologies for the exploration and exploitation of deep petroleum resources // *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*. – 2016. – Vol. 2. – P. 365–395. DOI: 10.1007/s40948-016-0038-y.
19. Huang W., Wang G., Gao D. A method for predicting the build-up rate of ‘push-the-bit’ rotary steering system // *Natural Gas Industry B*. – 2021. – Vol. 8. – № 6. – P. 622–627. DOI: 10.1016/j.ngib.2021.11.010.
20. Schaaf S., Mallary C.R., Pafitis D. Point-the-bit rotary steerable system: theory and field results // *SPE Annual Technical Conference and Exhibition? – SPE, 2000*. – C. SPE-63247-MS. DOI: 10.2118/63247-MS.
21. Sosnovskaya E.L., Avdeev A.N. Forecast of the stability of the array of gold ore deposits based on the analysis of core material from exploration core drilling wells // *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* – 2020. – № 3-1. – P. 216–223. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-31-0-216-223.
22. Mohamed A., Salehi S., Ahmed R. Significance and complications of drilling fluid rheology in geothermal drilling: a review // *Geothermics*. – 2021. – Vol. 93. – P. 1020–1066. DOI: 10.1016/j.geothermics.2021.102066.
23. Development of automatic electric drive drilling system for core drilling / Z. Zhou, Y. Hu, B. Liu, K. Dai, Y. Zhang // *Applied Sciences*. – 2023. – Vol. 13. – № 2. – P. 105–109. DOI: 10.3390/app13021059.
24. Evaluating the effectiveness of magnetic-pulse treatment for healing continuity defects in the metal of oil and gas pipelines / A. Schipachev, M. Aljadly, O. Ganzulenko, D. Chernikov, V. Razzhivin, R. Yusupov // *Metals*. – 2023. – Vol. 13. – № 11. – P. 1875. DOI: <https://doi.org/10.3390/met13111875>.
25. Activated crack growth and fracture toughness evaluation of pipeline steels using acoustic emission / O.G. Perveitov, V.V. Nosov, A.M. Schipachev, A.I. Alekhin // *Metals*. – 2023. – Vol. 13. – № 7. – P. 1272. DOI: <https://doi.org/10.3390/met13071272>.
26. Drenth Ch. Know your limits: drill rod bending capabilities and deviated hole applications // *Coring Magazine*. – 2017. – Vol. 5. – P. 16–19.
27. Лачинян Л.А., Медведев А.К. Обоснование конструкции резьбового соединения бурильной колонны в составе комплексов буровых снарядов со съемным керноприемником // *Разведка и охрана недр*. – 2021. – № 5. – С. 38–44.
28. Степанчукова А.В. Обзор современных мировых технологий изготовления труб, применяемых в геологоразведочном бурении // *Шаг в науку*. – 2021. – № 1. – С. 98–101.
29. Drenth Ch. Bulletin CDDA technical committee borehole deviation guidelines // *Conference: 2019 CDDA AGM*. – St. John’s, Newfoundland, 2–4 June 2020. – P. 1–4.
30. Рязанов В.И., Спиридонов Б.И. Анализ принципиальных схем отклонителей // *Известия Томского ордена Октябрьской революции Трудового Красного знамени политехнического института им. С.М. Кирова*. – 1976. – Т. 260. – С. 75–77.
31. Основные направления совершенствования технологии искусственного искривления скважин в твердых и крепких горных породах / В.В. Нескоромных, П.С. Пушмин, А.А. Надеяев, Л.С. Фадеева // *Науки о Земле и недропользование*. – 2008. – Т. 32. – № 6. – С. 186–190.
32. Stroud D., Russell M., Peach S. Development of the industry's first slimhole point-the-bit rotary steerable system // *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. – 2003. DOI: 10.2118/84449-MS.
33. Методика управления процессом бурения и экспериментальные исследования сил сопротивления при бурении долотами с резцами PDC / В.В. Нескоромных, М.С. Попова, А.Е. Головченко, П.Г. Петенёв, Л. Баочанг // *Записки Горного института*. – 2020. – Т. 245. – С. 539–546. DOI: 10.31897/PMI.2020.5.5
34. PDC bit steerability modeling and testing for push-the-bit and point-the-bit RSS / S. Menand, S. Christophe, L. Gerbaud, H. Denoix, C. Bruno, J. Gaombalet, Y. Amghar, H. Sinardet // *SPE/IADC Drilling Conference and Exhibition*. – 2012. DOI: 10.2118/151283-MS.

35. Torsional vibration analysis of push-the-bit rotary steerable drilling system / R. Wang, Q. Xue, L. Han, F. Sun, W. Yue // *Meccanica*. – 2014. – Vol. 49. – P. 1601–1615. DOI: 10.1007/s11012-014-9942-9.
36. Устройство для направленного бурения с отбором керна: пат. № 2832393, Российская Федерация, С1; заявл. 04.06.2024; опубл. 23.12.2024.

REFERENCES

1. Oberle B., Bringezu S., Hatfield-Dodds S., Hellweg S., Schandl H., Clement J. Global resources outlook: 2019. *International Resource Panel, United Nations Envio*. Paris, France, 2019. 181 p.
2. Smirnova E., Saychenko L. Hydrodynamic modeling and evaluation of partial substitution of cushion gas during creation of temporary underground gas storage in an aquifer. *International Journal of Engineering, Transactions A: Basics*, 2024, vol. 37, no. 7, pp. 1221–1230. DOI: 10.5829/ije.2024.37.07a.02.
3. Dvoynikov M.V., Minaev Ya.D., Minibaev V.V., Kambulov E.Yu., Lamosov M.E. Technology for killing gas wells at managed pressure. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 1, pp. 7–18. DOI: 10.18799/24131830/2024/1/4336. (In Russ.)
4. Litvinenko V., Bowbrick I., Naumov I., Zaitseva Z. Global guidelines and requirements for professional competencies of natural resource extraction engineers: implications for ESG principles and sustainable development goals. *Journal of Cleaner Production*, 2022, vol. 338, pp. 130–153. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130530>.
5. Bolshunov A.V., Vasilev D.A., Dmitriev A.N., Ignatev S.A., Kadochnikov V.G., Krikun N.S., Serbin D.V., Shadrin V.S. Results of complex experimental studies at Vostok station in Antarctica. *Journal of Mining Institute*, 2023, vol. 263, pp. 724–741. (In Russ.)
6. Fatehi M., Asadi Haroni H., Hossein Morshedy A. Designing infill directional drilling in mineral exploration by using particle swarm optimization algorithm. *Arabian Journal of Geosciences*, 2017, vol. 10, pp. 1–14. DOI: 10.1007/s12517-017-3209-4.
7. Caers J., Scheidt C., Yin Z., Wang L., Mukerji T., House K. Efficacy of Information in Mineral Exploration Drilling. *Natural Resources Research*, 2022, vol. 31, no. 3, pp. 1157–1173. DOI: 10.1007/s11053-022-10030-1.
8. Yang M., Hu Y., Liu B., Wang L., Zhou Z., Jia M. Application of artificial neural networks for identification of lithofacies by processing of core drilling data. *Applied Sciences*, 2023, vol. 13, no. 21, pp. 119–134. DOI: 10.3390/app132111934.
9. Hossein-Morshedy A., Khorram F., Emery X. A multi-objective approach for optimizing the layout of additional boreholes in mineral exploration. *Minerals*, 2023, vol. 13, no. 10, pp. 1252. DOI: 10.3390/min13101252.
10. Nwosu J.I., Egesi N. Predicting the true reserve of a steeply dipping deposit in a multi-deviation angle exploration operation. *Journal of Mining and Geology*, 2021, vol. 57, no. 2, pp. 397–406.
11. Hapugoda S., Manuel J.R. A comparison of drilling and sampling techniques as they relate to base and precious metal exploration in the Mt Isa Inlier of North West Queensland and the Southern Lachlan Fold Belt in New South Wales. *Sampling conference. Proceedings Sampling 2010*. Perth, 11–12 May 2010. pp. 2–14
12. Tomsikii K.O., Ivanova M.S. Optimization of the location of a multilateral well in a thin oil rim, complicated by the presence of an extensive gas cap. *Journal of Mining Institute*, 2024, vol. 265, pp. 140–146. (In Russ.)
13. Dvoynikov M.V., Nikitin V.I., Kopteva A.I. Analysis of the methodology for selecting the rheological model of cement slurry for determining the technological parameters of well casing. *International Journal of Engineering, Transactions A: Basics*, 2024, vol. 37, no. 10, pp. 2042–2050. DOI: 10.5829/ije.2024.37.10a.15
14. Korobov G.Y., Vorontsov A.A., Buslaev G.V., Nguyen V.T. Analysis of nucleation time of gas hydrates in presence of paraffin during mechanized oil production. *International Journal of Engineering*, 2024, vol. 37, pp. 1343–1356. DOI: 10.5829/ije.2024.37.07a.13.
15. Blinov P.A., Sadykov M.I., Gorelikov V.G., Nikishin V.V. Development and research of backfill compounds with improved elastic and strength properties for oil and gas well lining. *Journal of Mining Institute*, 2024, vol. 268, pp. 588–598. (In Russ.)
16. Zhang C., Zou W., Cheng N. Overview of rotary steerable system and its control methods. *2016 IEEE international conference on mechatronics and automation*, 2016. pp. 1559–1565. DOI: 10.1109/ICMA.2016.7558796.
17. Zhdaneev O.V., Zaytsev A.V., Prodan T.T. Possibilities for creating Russian high-tech bottomhole assembly. *Journal of Mining Institute*, 2021, vol. 252, pp. 872–884. DOI: 10.31897/PMI.2021.6.9. (In Russ.)
18. Ma T., Chen P., Zhao J. Overview on vertical and directional drilling technologies for the exploration and exploitation of deep petroleum resources. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*, 2016, vol. 2, pp. 365–395. DOI: 10.1007/s40948-016-0038-y.
19. Huang W., Wang G., Gao D. A method for predicting the build-up rate of ‘push-the-bit’ rotary steering system. *Natural Gas Industry B*, 2021, vol. 8, no. 6, pp. 622–627. DOI: 10.1016/j.ngib.2021.11.010.
20. Schaaf S., Mallary C.R., Pafitis D. Point-the-bit rotary steerable system: theory and field results. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, 2000. DOI: 10.2118/63247-MS.
21. Sosnovskaya E.L., Avdeev A.N. Forecast of the stability of the array of gold ore deposits based on the analysis of core material from exploration core drilling wells. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.*, 2020, no. 3-1, pp. 216–223. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-31-0-216-223.
22. Mohamed A., Salehi S., Ahmed R. Significance and complications of drilling fluid rheology in geothermal drilling: a review. *Geothermics*, 2021, vol. 93, pp. 1020–1066. DOI: 10.1016/j.geothermics.2021.102066.
23. Zhou Z., Hu Y., Liu B., Dai K., Zhang Y. Development of automatic electric drive drilling system for core drilling. *Applied Sciences*, 2023, vol. 13, no. 2, pp. 105–109. DOI: 10.3390/app13021059.
24. Schipachev A., Aljadly M., Ganzulenko O., Chernikov D., Razzhivin V., Yusupov R. Evaluating the effectiveness of magnetic-pulse treatment for healing continuity defects in the metal of oil and gas pipelines. *Metals*, 2023, vol. 13, no. 11, pp. 1875. DOI: <https://doi.org/10.3390/met13111875>.
25. Perveitalov O.G., Nosov V.V., Schipachev A.M., Alekhin A.I. Thermally activated crack growth and fracture toughness evaluation of pipeline steels using acoustic emission. *Metals*, 2023, vol. 13, no. 7, pp. 1272. DOI: <https://doi.org/10.3390/met13071272>.

26. Drenth Ch. Know your limits: drill rod bending capabilities and deviated hole applications. *Coring Magazine*, 2017, vol. 5, pp. 16–19.
27. Lachinyan L.A., Medvedev A.K. Justification of the design of the drill string threaded connection as a part of the complexes of drilling shells with a removable core receiver. *Exploration and protection of subsoil*, 2021, no. 5, pp. 38–44. (In Russ.)
28. Stepanchukova A.V. Review of modern world technologies of pipe manufacturing used in exploration drilling. *Step in Science*, 2021, no. 1, pp. 98–101. (In Russ.)
29. Drenth Ch. Bulletin CDDA technical committee borehole deviation guidelines. *Conference: 2019 CDDA AGM*. St. John's, Newfoundland, June 2–4, 2020. pp. 1–4.
30. Ryazanov V.I., Spiridonov B.I. Analysis of principle schemes of deflectors. *Proceedings of the Tomsk S.M. Kirov Polytechnic Institute, Order of the October Revolution, Order of the Labor Red Banner*, 1976, vol. 260, pp. 75–77. (In Russ.)
31. Neskromnykh V.V., Pushmin P.S., Nadelyaev A.A., Fadeeva L.S. Main directions of improvement of the technology of artificial well curvature in hard and hard rocks. *Earth Sciences and Subsoil Use*, 2008, vol. 32, no. 6, pp. 186–190. (In Russ.)
32. Stroud D., Russell M., Peach S. Development of the industry's first slimhole point-the-bit rotary steerable system. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, 2003. DOI: 10.2118/84449-MS.
33. Neskromnykh V.V., Popova M.S., Golovchenko A.E., Petenev P.G., Baochang L. Method of drilling process control and experimental studies of resistance forces during bits drilling with PDC cutters. *Journal of Mining Institute*, 2020, vol. 245, pp. 539–546. DOI: 10.31897/PMI.2020.5.5. (In Russ.)
34. Menand S., Christophe S., Gerbaud L., Denoix H., Bruno C., Gaombalet J., Amghar Y., Sinardet H. PDC bit steerability modeling and testing for push-the-bit and point-the-bit RSS. *SPE/IADC Drilling Conference and Exhibition*, 2012. DOI: 10.2118/151283-MS.
35. Wang R., Xue Q., Han L., Sun F., Yue W. Torsional vibration analysis of push-the-bit rotary steerable drilling system. *Meccanica*, 2014, vol. 49, pp. 1601–1615. DOI: 10.1007/s11012-014-9942-9.
36. Blinov P.A., Nikishin V.V., Silichev N.M. *Device for directional drilling with coring*. Invention application RF no. 2832393, 2024. (In Russ.)

Информация об авторах

Павел Александрович Блинов, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры бурения скважин, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Россия, 199106, г. Санкт-Петербург, 21 линия, 2; Blinov_PA@pers.spmi.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4379-8804>

Никита Михайлович Силичев, аспирант кафедры бурения скважин, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Россия, 199106, г. Санкт-Петербург, 21 линия, 2; nikita1silichev@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0009-5219-6539>

Вячеслав Валерьевич Никишин, кандидат технических наук, доцент кафедры бурения скважин, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Россия, 199106, г. Санкт-Петербург, 21 линия, 2; Nikishin_VV@pers.spmi.ru; <https://orcid.org/0009-0008-7973-1856>

Владимир Георгиевич Гореликов, доктор технических наук, старший научный сотрудник, профессор кафедры механики, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Россия, 199106, г. Санкт-Петербург, 21 линия, 2; Gorelikov_VG@pers.spmi.ru <https://orcid.org/0000-0003-2318-5186>

Поступила в редакцию: 19.07.2024

Поступила после рецензирования: 06.09.2024

Принята к публикации: 21.04.2025

Information about authors

Pavel A. Blinov, Cand. Sc., Associate Professor, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, 2, 21 line, St Petersburg, 199106, Russian Federation; Blinov_PA@pers.spmi.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4379-8804>

Nikita M. Silichev, Postgraduate Student, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, 2, 21 line, St Petersburg, 199106, Russian Federation; nikita1silichev@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0009-5219-6539>

Vyacheslav V. Nikishin, Cand. Sc., Associate Professor, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, 2, 21 line, St Petersburg, 199106, Russian Federation; Nikishin_VV@pers.spmi.ru; <https://orcid.org/0009-0008-7973-1856>

Vladimir G. Gorelikov, Dr. Sc., Professor, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, 2, 21 line, St Petersburg, 199106, Russian Federation; Gorelikov_VG@pers.spmi.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2318-5186>

Received: 19.07.2024

Revised: 06.09.2024

Accepted: 21.04.2025

УДК 622.684:519.81

DOI: 10.18799/24131830/2025/7/4786

Шифр специальности ВАК: 1.6.6, 1.6.16

Научная статья

Универсальная система критериев выбора автосамосвалов для глубоких карьеров

К.В. Бурмистров[✉], Н.А. Осинцев, А.Н. Рахмангулов, М.А. Багдасарян

Магнитогорский государственный технический университет, Россия, г. Магнитогорск

[✉]k.burmistrov@magtu.ru

Аннотация. Актуальность. Устойчивое развитие и функционирование горнодобывающих предприятий как основных источников экономического роста во многих странах определяется балансом экономических, экологических и социальных целей, а также ресурсами, необходимыми для их достижения. Транспорт является наиболее многочисленным и затратным видом оборудования на глубоких карьерах. На его долю приходится до 70 % эксплуатационных расходов на добычу полезного ископаемого. Рабочие параметры транспортных средств должны соответствовать параметрам карьера и отвечать условиям его эксплуатации. Увеличение грузоподъемности карьерных автосамосвалов, расширение модельного ряда у производителей карьерной техники, а также возрастающее количество производителей и поставщиков карьерных автосамосвалов привело к тому, что у горнодобывающих предприятий появилось большое количество возможных альтернатив компоновки транспортной системы карьеров. На выбор конкретной модели карьерных автосамосвалов оказывает влияние значительное количество факторов. Это предопределяет необходимость многофакторного подхода к решению задачи по выбору карьерных автосамосвалов. Ключевыми задачами в таких условиях являются обоснование системы критериев оценки данных факторов и выбор наиболее эффективных методов оценки, обеспечивающих точные и надёжные результаты. **Цель:** систематизация и определение значимости критериев выбора автосамосвалов для условий глубоких карьеров. **Объекты:** карьер, транспортная система. **Методы:** обзор научной литературы, системный анализ, многокритериальные методы принятия решений. **Результаты.** Разработана универсальная система критериев выбора модели автосамосвала для условий глубоких карьеров. Новизна предложенной системы заключается в комплексном учёте всех известных в настоящее время факторов и критериев выбора автосамосвала и разработке универсальной двухуровневой системы оценки, включающей четыре глобальных критерия (технический, технологический, экологический, экономико-организационный) и 32 подкритерия. Предложена методика определения значимости критериев с использованием многокритериального метода принятия решений «Лучший худший метод» (Best Worst Method). Разработана методика систематизации критериев выбора карьерных автосамосвалов с учётом целей и задач лиц, принимающих решения по выбору и эксплуатации автосамосвалов на различных уровнях управления горнодобывающим предприятием. Полученные ранги (весовые коэффициенты) критериев рекомендуется использовать руководителям горнодобывающих предприятий и специалистам проектных организаций для выбора моделей автосамосвалов в конкретных условиях эксплуатации.

Ключевые слова: карьер, модель автосамосвала, многокритериальные методы, система критериев, выбор

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проекты №23-21-10040 и №23-21-10038).

Для цитирования: Универсальная система критериев выбора автосамосвалов для глубоких карьеров / К.В. Бурмистров, Н.А. Осинцев, А.Н. Рахмангулов, М.А. Багдасарян // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 7. – С. 29–44. DOI: 10.18799/24131830/2025/7/4786

UDC 622.684:519.81

DOI: 10.18799/24131830/2025/7/4786

Scientific paper

Universal system of criteria for selecting deep open pit dump trucks

K.V. Burmistrov✉, N.A. Osintsev, A.N. Rakhmangulov, M.A. Bagdasaryan

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russian Federation

✉k.burmistrov@magtu.ru

Abstract. Relevance. Sustainable development and operation of mining enterprises as major sources of economic growth in many countries is determined by the balance of economic, environmental and social objectives, as well as by the resources required to achieve them. Transportation is the most numerous and costly type of equipment in deep open pits. It accounts for up to 70% of the operating expenses of mineral extraction. Operating parameters of transportation means should correspond to the parameters of the open pit and meet the conditions of its operation. Many alternative variants of open pit transportation system layouts have appeared. This is due to the increase in carrying capacity of dump trucks, expansion of the model range of equipment manufacturers, as well as the increase in number of manufacturers and suppliers of dump trucks. The choice of a particular dump truck model is influenced by a significant number of factors. This predetermines the need for a multifactor approach to solving the problem of selecting dump trucks. The key tasks in such conditions are justifying the system of criteria for evaluation of relevant factors and selecting the most effective evaluation methods that provide accurate and reliable results. **Aim.** Systematization and determination of significance of dump truck selection criteria for deep pit conditions. **Objects.** Open pit, transportation system. **Methods.** Literature review, system analysis, multi-criteria decision making. **Results.** The authors have developed a universal system of criteria for selecting a dump truck model for deep open pits. The novelty of the proposed system lies in the complex consideration of all relevant factors known to date and criteria of dump truck selection and the development of a universal two-level evaluation system, including four global criteria (technical, technological, environmental, economic and organizational) and 32 sub-criteria. The authors proposed a methodology for determining the significance of criteria using the multi-criteria decision-making method Best Worst Method. They developed a methodology of criteria systematization for selection of dump trucks that considers the goals and objectives of decision makers on selection and operation of dump trucks at different levels of management of mining enterprises. The obtained ranks (weight coefficients) of criteria are recommended to be used by managers of mining enterprises and specialists of design organizations for dump truck model selection in specific operating conditions.

Keywords: open pit, dump truck model, multi-criteria methods, criteria system, selection

Acknowledgements: The work was carried out with the financial support of the Russian Science Foundation (Projects No. 23-21-10040, 23-21-10038).

For citation: Burmistrov K.V., Osintsev N.A., Rakhmangulov A.N., Bagdasaryan M.A. Universal system of criteria for selecting deep open pit dump trucks. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 7, pp. 29–44. DOI: 10.18799/24131830/2025/7/4786

Введение

В настоящее время основной объем перевозок горной массы на карьерах осуществляется автосамосвалами. Несмотря на то, что рекомендуемая область применения карьерных автосамосвалов ограничивается предельным расстоянием транспортирования в 4–5 км [1], дальность перевозок на некоторых карьерах приближается к 10 км при текущей глубине в 600–700 м [2]. Увеличение предельно допустимого расстояния транспортирования горной массы карьерными автосамосвалами стало возможным благодаря увеличению грузоподъемности и расширению модельного ряда. Максимальная грузоподъемность автосамосвалов в настоящее время составляет 450 т [3]. Затраты на транспорти-

рование горной массы для условий глубоких карьеров возрастают в среднем на 20–30 % на каждые 100 м увеличения глубины, достигая 60–70 % от общих затрат на разработку месторождения [4–6].

Для сокращения затрат на транспортирование горной массы увеличивают грузоподъемность применяемых автосамосвалов [7, 8], карьерные автосамосвалы переводят на более дешёвые виды топлива [9], применяют эклектическую или дизель-электрическую тягу [10], а также переходят на комбинированный транспорт, предусматривающий два и более вида транспорта для доставки грузов. Многие учёные связывают основные перспективы транспортирования горной массы с глубокими горизонтами карьера с развитием циклично-поточной

технологии, основанной на использовании автомобильного и конвейерного транспорта [11, 12]. Однако и в этом случае доля перевозок автосамосвалами остаётся достаточно большой [13, 14].

Увеличение глубины карьеров и, соответственно, расстояния транспортирования горной массы и потребного количества горного оборудования приводит не только к повышению себестоимости добычи полезного ископаемого, но и увеличивает негативное воздействие на окружающую среду. Экологические вопросы в настоящее время начинают оказывать значительное влияние на принятие проектных решений [15–17]. Особенно актуальны вопросы негативного влияния работы оборудования на атмосферу в глубоких карьерах, заключающегося в основном в выбросах от работы двигателей автосамосвалов и пылении при транспортировании пород [18].

Увеличение грузоподъёмности карьерных автосамосвалов, расширение модельного ряда у производителей карьерной техники, а также возрастающее количество производителей и поставщиков карьерных автосамосвалов привело к тому, что у горнодобывающих предприятий появилось большое количество возможных альтернатив компоновки транспортной системы карьеров.

На выбор конкретной модели карьерных автосамосвалов оказывает влияние значительное количество факторов. Так, при использовании одной и той же модели экскаватора возможно большое количество вариантов карьерных автосамосвалов различных производителей, отличающихся своими техническими характеристиками. Вопросы выбора моделей автосамосвалов возникают как при проектировании карьеров, так и в процессе эксплуатации. Особую сложность приобретают вопросы выбора карьерных автосамосвалов для глубоких карьеров, так как на таких предприятиях за весь период разработки месторождения парк автосамосвалов полностью заменяется несколько раз. Количество техники в карьере увеличивается по мере его углубления. На один карьерный экскаватор при глубине карьера до 200 м приходится не менее 3–4 автосамосвалов, а при глубине 200–600 м – 10 и более. Кроме того, карьерный транспорт составляет основную массу оборудования и в 2,1–3,7 раза превышает количество всех остальных видов техники для основных технологических процессов. На долю автосамосвалов приходится от 60 до 75 % выбросов [19].

Авторы проанализированных нами научных работ рассматривают различные факторы, влияющие на выбор автосамосвала, в зависимости от целей исследований. Так, в [20] выбор вида и модели горного транспорта предлагается осуществлять с учётом таких факторов, как характеристики пере-

возимого груза, дальность перевозки, масштаб работ и темп освоения месторождения. В [21] выделяют следующие базовые условия, влияющие на выбор самосвала для карьера: отношение вместимости кузова самосвала к вместимости ковша экскаватора должно составлять в среднем 4–6; увеличение грузоподъёмности автосамосвалов с увеличением глубины карьеров, расстояния транспортирования и объёмов перевозки горной массы. В [22] при выборе автосамосвалов предлагается учитывать манёвренность, грузоподъёмность и безопасность для персонала. Подробный анализ факторов, оказывающих влияние на выбор модели автосамосвала, представлен в работе [19].

Анализ результатов современных исследований показывает, что для обеспечения эффективной эксплуатации карьерных автосамосвалов на глубоких карьерах при выборе моделей необходимо учитывать технические, технологические, экономические, экологические, природные и организационные факторы. Большое количество факторов, а также специфика производства работ на больших глубинах предопределяет необходимость многофакторного подхода к решению задачи по выбору карьерных автосамосвалов. Ключевыми задачами в таких условиях являются обоснование системы критериев оценки данных факторов и выбор наиболее эффективных методов оценки, обеспечивающих точные и надёжные результаты.

Анализ методов и критериев выбора карьерных автосамосвалов

Наиболее распространённым методом выбора автосамосвалов на карьерах является технико-экономическое сравнение нескольких конкурирующих вариантов. Решение принимается по критерию минимума капитальных затрат на приобретение оборудования и будущих эксплуатационных расходов. Однако акцент преимущественно на экономические показатели не позволяет учитывать экологичность использования автомобилей, оснащение автосамосвалов современными системами, влияющими на безопасность работ, автоматизацию процесса и другие важные факторы их эксплуатации. Процесс выбора карьерных автосамосвалов в результате стремления соблюсти социальные и экологические требования становится субъективным из-за необходимости учесть множество факторов или критериев, а также их взаимовлияние. Для научно-обоснованного выбора автосамосвалов необходимо использование многокритериальных методов принятия решений. В работе [19] исследованы существующие многокритериальные модели и методы выбора карьерных автосамосвалов и погрузочно-разгрузочного оборудования на открытых горных работах. В результате анализа установлено,

В публикациях российских авторов наибольшее внимание уделяется геологическим (природным) критериям, таким как свойства транспортируемых пород, погодные условия; техническим – производительность машин, преодолеваемый уклон; экологическим – выбросы загрязняющих веществ. Зарубежные авторы акцентируют внимание на таких технических критериях, как особенности трансмиссии, двигателя автосамосвалов; предлагают учитывать безопасность эксплуатации, условия сервисного обслуживания машин. Большинство российских и зарубежных авторов учитывают в своих исследованиях расстояние транспортирования пород, а также экономические показатели – капитальные и текущие затраты на приобретение и эксплуатацию машин.

Таким образом, наличие большого количества критериев оценки выбора автосамосвалов, различная степень их влияния на принятие решений, а также отсутствие универсальной системы комплексной оценки, учитывающей особенности эксплуатации и устойчивого развития горнодобывающего предприятия, делает актуальной задачу систематизации критериев, определяющих выбор модели автосамосвала.

Модели и методы

Систематизация критериев, определяющих выбор модели автосамосвала

Систематизация критериев, определяющих выбор модели карьерных автосамосвалов, выполнялась в пять этапов:

Этап 1. Анализ исследований в области выбора горного оборудования, автосамосвалов, планирования и организации работы горного транспорта с целью определения факторов, влияющих на выбор автосамосвалов и формирование перечня критериев, по которым в настоящее время выполняется выбор автосамосвалов на горнодобывающих предприятиях.

Было проанализировано 49 статей [19] по выбору автосамосвалов, комплексов оборудования для карьеров, а также исследования по особенностям работы транспорта в глубоких карьерах. В результате выявлен 71 уникальный критерий. По каждому критерию собраны следующие данные: наименование критерия, определение (краткая характеристика) критерия, единица измерения, целевое значение и диапазон изменения значений критерия. Разнообразие и большое количество существующих критериев выбора автосамосвалов привели к необходимости их группировки.

Этап 2. Первичная группировка существующих критериев по факторам, влияющим на выбор автосамосвала. Основная идея группировки критериев заключается в их объединении в отдельные группы в зависимости от сущности критериев. Поскольку авторы в статьях используют различные термины применительно к критериям выбора самосвалов

(например, индикаторы, показатели, параметры, критерии и субкритерии) в данной работе используется следующие термины: критерии (глобальные критерии) – применительно к группам факторов, влияющим на выбор автосамосвала (технические, технологические, геологические (природные), организационные, экономические и экологические); подкритерии (локальные критерии) – конкретные показатели и параметры выбора автосамосвала. Таким образом, была сформирована двухуровневая система оценки, которая включала шесть критериев и 71 подкритерий. Количество подкритериев в группах составило от 4 до 26, что затрудняет дальнейшую оценку и делает необходимым вторичную группировку критериев.

Этап 3. Вторичная группировка с целью уменьшения количества подкритериев. Группировка осуществлялась путём объединения схожих критериев и подкритериев по смыслу, единицам измерения, диапазону допустимых значений и целевым значениям. Выполнено объединение природных и экологических критериев, а также организационных и экономических критериев. Кроме того, исключены из рассмотрения условно-постоянные подкритерии, а также зависимые подкритерии. Например, технический показатель «продолжительность разгрузки автосамосвала» исключается, так как он условно одинаков для всех карьерных автосамосвалов, а время, затрачиваемое на разгрузку, не превышает 1 % от общей продолжительности цикла. Другой технический показатель «среднее сопротивление качению» также исключён, поскольку его значение зависит от других подкритериев, уже включённых в группу технических критериев. Таким образом, в результате вторичной группировки окончательно выделено 4 критерия (технические, технологические, природные и экологические, экономические и организационные). Количество подкритериев сократилось с 71 до 43.

Этап 4. Распределение подкритериев по уровням компетентности экспертов для дальнейшего ранжирования и определения веса подкритериев на каждом уровне. Такое распределение необходимо для получения наиболее объективной и качественной оценки критериев. Идея заключается в том, что наиболее качественную оценку критериям и подкритериям могут дать эксперты с компетенциями, максимально соответствующими содержанию подкритерия. В связи с тем, что специалисты предприятия, принимающие решение в выборе карьерных автосамосвалов, обладают различными компетенциями, преследуют отличающиеся цели в данном исследовании, в соответствии с подходом [19], предлагается выделить три уровня экспертных компетенций: стратегический, конструктивный и оптимизационный (табл. 1).

Таблица 1. Система критериев выбора карьерных автосамосвалов

Table 1. System of criteria for selecting dump trucks

Критерии Criteria	Подкритерии Sub-criteria	Ед. изм. Unit	Источник получения информации* Data source*	Целевое значение Target	Уровень/Level		
					1	2	3
Технические (Т) Technical (T)	Срок службы автосамосвалов Useful life (T1)	годы, моточасы years or motor hours	ТХ/А	max	1	–	–
	Преодолеваемый уклон/Grade (T2)	град/grad, %, ‰			–	2	–
	Коэффициент тары Net to tare ratio (T3)	доли/fractions		min	–	2	–
	Безопасность (технологическая и си- стемы безопасности)/Safety (T4)	балл/score	Э/D		max	1	–
	Комфортность (эргономика) Comfort, ergonomics (T5)			1		–	3
	Простота обслуживания Ease of maintenance (T6)			–		–	3
	Управляемость автосамосвалом Dump truck controllability (T7)			–		–	3
	Минимальный радиус поворота Minimum turning radius (T8)	м/m	ТХ/А	min	–	2	–
	Грузоподъёмность Payload capacity (T9)	т/t		max	–	2	–
	Тип кузова/Dump truck tray type (T10)	балл/score			–	2	–
	Ширина автосамосвала Dump truck width (T11)	м/m		min	–	2	3
Технологические (ТЛ) Technological (TL)	Совместимость с выемочно-погру- зочным и дробильным оборудованием Match with excavator and crusher (TL1)	м³/м³ m³/m³	АР/С	max	–	2	3
	Ширина транспортных берм Haul road width (TL2)	м/m	ТХ, П/А, В	min	–	2	–
	Коэффициент использования грузо- подъёмности/Payload factor (TL3)	доли/fractions	АР/С	max	–	2	–
	Глубина карьера/Open pit depth (TL4)	м/m	П/В		1	–	–
	Производительность карьера Production rate (TL5)	млн т/год mln t per year	П/В		1	–	–
	Качество дорожного покрытия Haul road condition (TL6)	балл/score	Э/D	–	2	3	
	Потребное количество автосамосвалов Required dump trucks fleet (TL7)	ед./pcs	П/В	min	1	2	3
Природные и экологические (Е) Environmental (E)	Объём образующихся отходов Waste materials produced (E1)	т/год tons per year	АР/С	min	1	2	–
	Объём выбросов загрязняющих веществ/Air pollution (E2)	м³/год m³ per year			1	2	3
	Уровень шума/Noisy (E3)	дБ/decibels	АР/С	–	–	3	
	Тип и параметры месторождений Type and geometry of deposit (E4)	балл/score	Э/D	max	1	2	–
	Соответствие климатическим зо- нам/Climatic zone match (E5)				–	–	3
Экономические и организационные (ЕО) Economic and organizational (EO)	Коэффициент технической готовности Availability (EO1)	доли/fractions	АР/С	max	–	2	–
	Капитальные затраты/CAPEX (EO2)	р./\$		min	1	2	–
	Эксплуатационные расходы/OPEX (EO3)			–	2	–	
	Стоимость перепродажи Resale value (EO4)		балл/score	Э/D	min	1	–
	Престиж производителя Manufacture reputation (EO5)	1				–	–
	Надёжность работы автосамосвала Reliability (EO6)	–				–	3
	Условия сервисного обслуживания Back-up service (Support) (EO7)	–				–	3
	Наличие навыка у персонала Labor skill (EO8)	–				–	3
	Уровень технологии (роботизация, автоматизация)/Technological level (robotization, automation) (EO9)	1				2	3

*ТХ – техническая характеристика автосамосвала; П – проект на разработку месторождения; АР – аналитический расчёт; Э – экспертная оценка/А – technical characteristics of dump truck, В – field development project, С – analytical calculation; Д – expert evaluation.

Уровень 1 (стратегический). Эксперты этого уровня обладают компетенциями в области стратегического управления горнодобывающим предприятием. Эти эксперты оценивают подкритерии, определяющие финансовые показатели и репутацию компании. К экспертам первого уровня относятся владельцы или президенты компаний, ключевые руководители, директора (генеральные, коммерческие, технические и др.), а также их заместители.

Уровень 2 (конструктивный). Эксперты оценивают подкритерии, которые используются при принятии проектных решений. Экспертами второго уровня являются руководители и специалисты проектно-технического отдела, главные специалисты (инженеры, горняки, геологи, маркшейдеры), руководители и специалисты планово-экономических отделов, руководители отделов охраны труда и экологии.

Уровень 3 (оптимизационный). На этом уровне эксперты оценивают подкритерии, непосредственно связанные с процессом эксплуатации и обслуживания автосамосвалов в карьере. К экспертам третьего уровня относятся механики, энергетики, начальники карьеров, транспортных отделов, начальники смен, горные мастера и др.

Количество подкритериев на каждом уровне различается. На стратегическом уровне для оценки используются 13 подкритериев, на конструктивном – 18, а на оптимизационном – 15. Некото-

рые подкритерии были отнесены к зонам ответственности специалистов нескольких уровней.

Методика определения веса критериев выбора модели автосамосвалов с использованием Best Worst Method

Наличие множества подкритериев, влияющих на выбор модели автосамосвала для условий глубоких карьеров, делает целесообразным использование многокритериальных методов принятия решений. На рис. 2 представлена принципиальная схема методики расчёта весов критериев и подкритериев выбора карьерных автосамосвалов с использованием «Лучшего худшего метода» (Best Worst Method – BWM). «Лучший худший метод» впервые предложен в работе [23]. Основная идея метода основана на выборе «лучшего» и «худшего» критериев оценки исследуемого объекта и последующем парном сравнении каждого из них со всеми остальными критериями оценки. Определение веса всех критериев выполняется путём решения задачи максимального минимума и расчёта коэффициента несогласованности и оценки достоверности сравнений. Преимущества BWM по сравнению с другим, часто используемым в горном деле, многокритериальным методом – АНР следующие: BWM относительно прост в расчётах из-за неиспользования дробных чисел, меньшее число парных сравнений ($(2n-3)$ в BWM против $(n(n-1)/2)$ в АНР), наиболее надёжные результаты [24, 25].

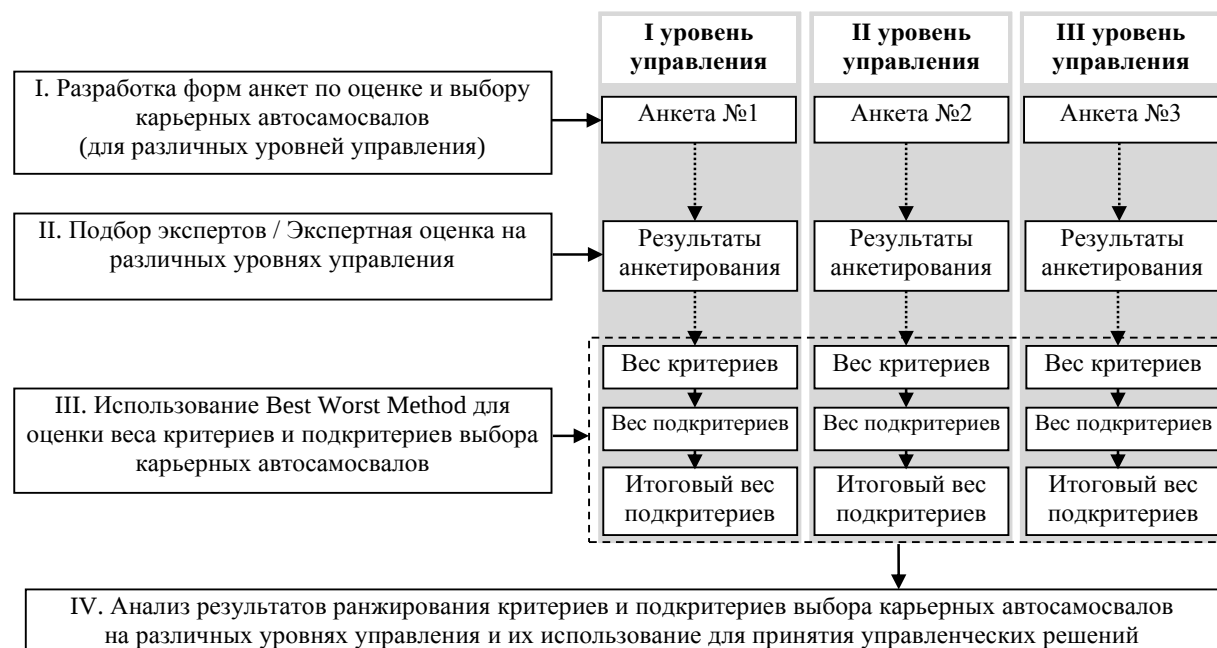


Рис. 2. Схема методики расчёта весов критериев и подкритериев выбора моделей карьерных автосамосвалов с использованием метода BWM

Fig. 2. Methodology for calculating the weights of criteria and sub-criteria for selecting dump truck models using the BWM method

Основными этапами методики являются:

I. Разработка форм анкет по оценке и выбору карьерных автосамосвалов.

Форма анкеты разрабатывается в соответствии с уровнем управления горнодобывающим предприятием – уровнем экспертных компетенций. Каждая анкета содержит комплекс критериев и подкритериев оценки автосамосвалов, соответствующих конкретному уровню. Таким образом, каждая анкета включает оценку по четырём критериям и по 13–18 подкритериям, в зависимости от уровня управления (табл. 1).

II. Подбор экспертов и экспертная оценка на различных уровнях управления.

В состав экспертной группы могут входить руководители и специалисты различных горнодобывающих предприятий, а также специалисты профильных проектных и научно-исследовательских организаций. Подбор экспертов осуществляется по каждому уровню управления. Каждый эксперт должен заполнить анкету, соответствующую уровню его компетенции.

III. Использование BWM для оценки веса критериев и подкритериев выбора карьерных автосамосвалов. BWM в общем виде состоит из шести этапов [23]:

Этап 1. Формирование комплекса критериев оценки выбора автосамосвалов. Комплекс критериев в общем виде записывается как $C = \{C_1, C_2, \dots, C_n\}$, где n – количество критериев оценки.

Этап 2. Определение наилучшего и наихудшего критериев.

Лицо, принимающее решение (ЛПР), определяет наиболее важный («лучший») и наименее значимый («худший») критерий из комплекса $C = \{C_1, C_2, \dots, C_n\}$.

Этап 3. Сравнение наилучшего критерия со всеми остальными критериями.

ЛПР указывает предпочтение наилучшего критерия B перед другими критериями, используя число от 1 до 9 (где 1 означает равную важность, а 9 означает, что лучший критерий намного важнее рассматриваемого критерия). В результате сравнения создаётся вектор A_B «от лучшего к другим»:

$$A_B = (a_{B1}, a_{B2}, \dots, a_{Bn}),$$

где a_{Bj} – предпочтение наилучшего критерия B критерию j .

Этап 4. Сравнение наихудшего критерия со всеми остальными критериями.

Аналогично предыдущему этапу ЛПР указывает предпочтение всех критериев по отношению к наихудшему критерию W , используя число от 1 до 9. В результате сравнения создаётся вектор A_W «от других к худшему»:

$$A_W = (a_{1W}, a_{2W}, \dots, a_{nW}),$$

где a_{jW} – предпочтение критерия j над наихудшим критерием W .

Этап 5. Определение относительной важности критериев путём расчёта окончательных и оптимальных весов.

Критерии оптимальных весов $(w_1^*, w_2^*, \dots, w_n^*)$ рассчитываются следующим образом: для каждой пары $\frac{w_B}{w_j}$ и $\frac{w_j}{w_W}$ оптимальный вес должен удовлетво-

рять требованию $\left| \frac{w_B}{w_j} - a_{Bj} \right|$ и $\left| \frac{w_j}{w_W} - a_{jW} \right|$. Цель состоит

в том, чтобы определить оптимальные веса критериев так, чтобы максимальные абсолютные разно-

сти $\left| \frac{w_B}{w_j} - a_{Bj} \right|$ и $\left| \frac{w_j}{w_W} - a_{jW} \right|$ для всех j были минималь-

ны, что переводится в следующую модель:

$$\min \max_j \left\{ \left| \frac{w_B}{w_j} - a_{Bj} \right|, \left| \frac{w_j}{w_W} - a_{jW} \right| \right\}$$

$$\sum_j w_j = 1, w_j \geq 0, \text{ для всех } j. \quad (1)$$

Модель (1) может быть преобразована как:

$$\left| \frac{w_B}{w_j} - a_{Bj} \right| \leq \xi, \text{ для всех } j$$

$$\left| \frac{w_j}{w_W} - a_{jW} \right| \leq \xi, \text{ для всех } j$$

$$\sum_j w_j = 1, w_j \geq 0, \text{ для всех } j. \quad (2)$$

Оптимальные веса критериев получаются в результате решения уравнения (2).

Этап 6. Расчёт коэффициента согласованности (K_{si}) для оценки надёжности парных сравнений.

Коэффициент согласованности определяется по следующей формуле:

$$K_{si} = \frac{\xi^*}{CI}.$$

где ξ^* – максимальное значение ξ , которое определяется на основе решения уравнений (4); CI – значение индекса согласованности, определяется по табл. 2 [17] и соответствует максимальному значению предпочтений a_{BW} .

Таблица 2. Значения индекса согласованности CI для метода BWM [23]

Table 2. CI consistency index values for the BWM method [23]

авв	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$CI (\max \xi^*)$	0	0,44	1,00	1,63	2,30	3,00	3,73	4,47	5,23

Аналогичные расчёты выполняются для определения веса подкритериев на каждом уровне управления. Окончательные весовые коэффициенты подкритериев определяются как произведение весов критериев и подкритериев. Чем выше значение весового коэффициента подкритерия, тем большее влияние он оказывает на выбор модели автосамосвала в карьере.

IV. Анализ результатов ранжирования критериев и подкритериев выбора карьерных автосамосвалов на различных уровнях управления и использование полученных результатов для принятия управленческих решений.

Анализ результатов ранжирования критериев и подкритериев выбора автосамосвалов сводится к поиску ответов на следующие вопросы:

1. Совпадают ли оценки важности критериев и подкритериев у экспертов различных групп?
2. Какие критерии и подкритерии являются приоритетными для каждой группы экспертов?

Окончательные результаты данного анализа являются руководством для ЛПР об установлении окончательных значений весовых коэффициентов критериев выбора автосамосвалов, которые в дальнейшем будут использованы в многокритериальной

модели принятия решений для выбора конкретной модели автосамосвала в карьере.

Расчётный пример реализации методики

В качестве исходных данных для расчёта веса критериев и подкритериев выбора карьерных автосамосвалов использованы результаты экспертной оценки, представленные в работе [19]. В качестве экспертов были привлечены руководители и специалисты горнодобывающих предприятий, разрабатывающих железную руду, медную руду, золоторудное сырьё, строительные горные породы, а также сырьё для химической и металлургической промышленности.

В качестве экспертов 1-го уровня управления выступили два генеральных директора, заместитель генерального директора, директор, руководитель департамента. Экспертами 2-го уровня являлись главный геолог, два главных маркшейдера, главный горняк, начальник проектно-технического отдела и главный инженер. На 3-м уровне управления экспертами являлись два главных механика, ведущий специалист ПТО и три горных мастера.

Экспертами были заполнены формы анкет, содержащих варианты комбинации критериев и подкритериев выбора автосамосвалов (табл. 1).

Результаты расчётов методом BWM представлены в табл. 3.

На рис. 3–5 представлены окончательные результаты оценки весов подкритериев по уровням управления. Цвета прямоугольников соответствуют цветам из табл. 1.

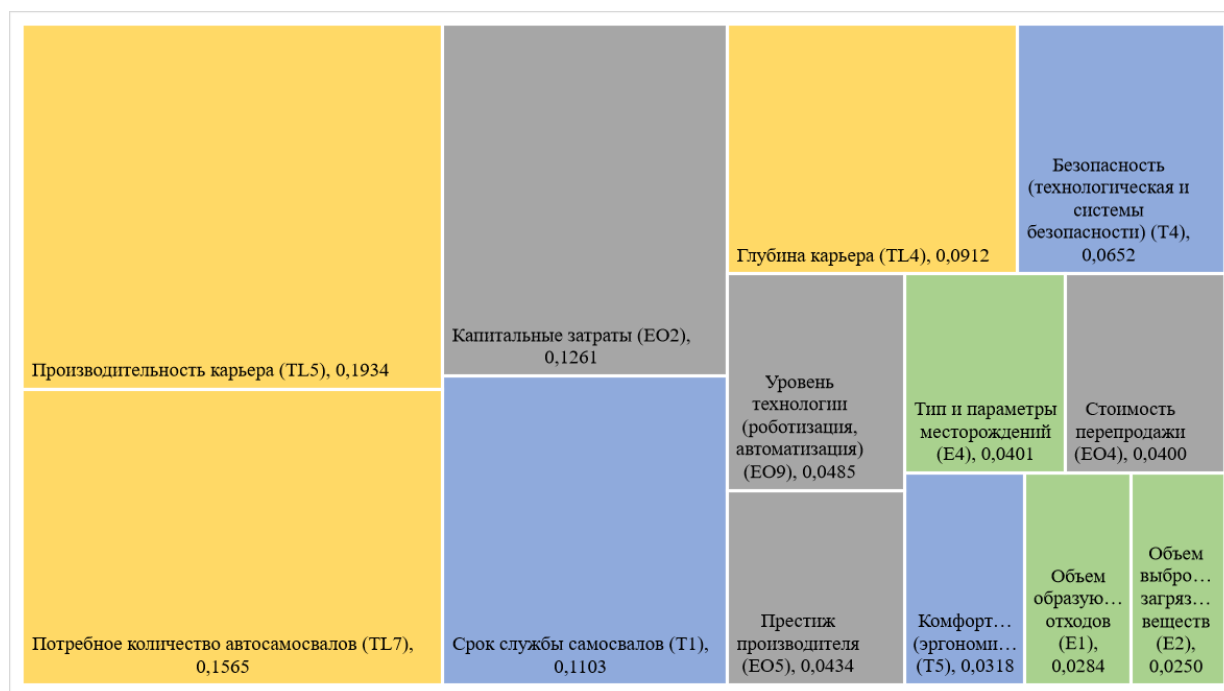


Рис. 3. Результаты оценки веса подкритериев выбора карьерных автосамосвалов методом BWM (1-й уровень управления)

Fig. 3. Results of weight assessment of sub-criteria for selection of dump trucks by BWM method (1st level of management)

Таблица 3. Результаты расчёта весов критериев и подкритериев выбора карьерных автосамосвалов

Table 3. Results of calculating the weights of criteria and sub-criteria for selecting dump trucks

Эксперты Experts	Критерии/Criteria				Коэф. соглас. Ksi Consistency coefficient Ksi
	Технические (Т) Technical (T)	Технологические (TL) Technological (TL)	Природные и экологические (Е) Environmental (E)	Экономические и организационные (ЕО) Economic and organizational (EO)	
1 уровень управления/Level 1					
Эксперт 1 Experts 1	0,181818	0,545454	0,090909	0,181818	0,0000
Эксперт 2 Experts 2	0,180327	0,557377	0,081967	0,180327	0,0163
Эксперт 3 Experts 3	0,368421	0,368421	0,070175	0,192982	0,0175
Эксперт 4 Experts 4	0,122449	0,55102	0,122449	0,204082	0,0612
Эксперт 5 Experts 5	0,183673	0,183673	0,102041	0,530612	0,0204
Среднее Average	0,207338	0,441189	0,093508	0,257964	–
2 уровень управления/Level 2					
Эксперт 6 Experts 6	0,333333	0,166667	0,333333	0,166667	0,0000
Эксперт 7 Experts 7	0,250000	0,375000	0,125000	0,250000	0,1250
Эксперт 8 Experts 8	0,641975	0,135802	0,08642	0,135802	0,0370
Эксперт 9 Experts 9	0,198020	0,564356	0,089109	0,148515	0,0297
Эксперт 10 Experts 10	0,630435	0,163043	0,076087	0,130435	0,0217
Эксперт 11 Experts 11	0,500000	0,250000	0,083333	0,166667	0,0000
Среднее Average	0,425627	0,275812	0,132214	0,166348	–
3 уровень управления/Level 3					
Эксперт 12 Experts 12	0,419355	0,225806	0,129032	0,225806	0,0322
Эксперт 13 Experts 13	0,606742	0,235955	0,05618	0,101124	0,1011
Эксперт 14 Experts 14	0,606742	0,235955	0,05618	0,101124	0,1011
Эксперт 15 Experts 15	0,333333	0,333333	0,166667	0,166667	0,0000
Эксперт 16 Experts 16	0,400000	0,400000	0,133333	0,066667	0,0000
Эксперт 17 Experts 17	0,400000	0,400000	0,100000	0,100000	0,0000
Среднее Average	0,461029	0,305175	0,106899	0,126898	–

Оценка чувствительности результатов многокритериального анализа выполнена на основе сравнения результатов BWM с результатами, полученными другим многокритериальным методом – методом полной согласованности (Full Consistency Method – FUCOM) [24]. Выбор FUCOM обоснован высокой надёжностью получения результатов многокритериальной оценки. Кроме того, в FUCOM сокращается количество парных сравнений для отображения n числа критериев, равное $(n-1)$ парных сравнений для FUCOM, по сравнению с BWM, равным $(2n-3)$ парных сравнений. Диаграммы на рис. 6 показывают высокую согласованность методов FUCOM и BWM, что говорит о надёжности полученных результатов.

Обсуждение результатов

Анализ результатов расчётов, представленных на рис. 3–5 и в табл. 4, показывает, что оценки значимости критериев и подкритериев выбора автосамосвала различаются у экспертов разного уровня управления.

На начальном этапе исследования авторы сделали несколько предположений. Эти предположения связаны с ориентацией экспертов определённого уровня компетентности на критерии, соответствующие их сфере деятельности. Гипотеза о том, что эксперты уровня 1 отдают предпочтение экономическим и экологическим критериям, заключалась в том, что эти эксперты ориентированы на

принятие стратегических решений. К таким решениям относятся, например, максимизация финансовых результатов всей компании, а также укрепление репутации компании путём реализации различных экологических и социальных мероприятий. Упор на технологические критерии ожидался у экспертов уровня 2, поскольку эти эксперты отвечают за оперативное планирование. Наконец, при-

оритет технических критериев ожидался в оценках экспертов 3-го уровня, поскольку они непосредственно эксплуатируют автосамосвалы и заинтересованы в их надёжности и безопасности. Однако все вышеперечисленные гипотезы не подтвердились. Детальный анализ полученных результатов позволил найти объяснения расхождению между фактическими и ожидаемыми результатами.

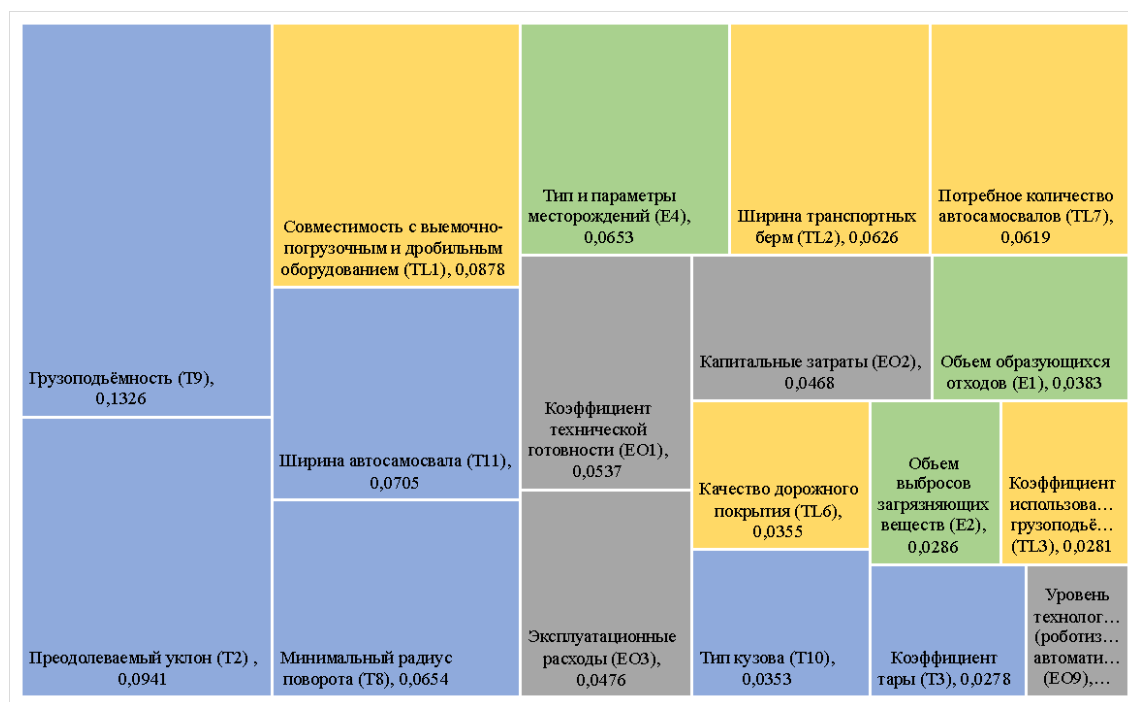


Рис. 4. Результаты оценки веса подкритериев выбора карьерных автосамосвалов методом BWM (2-й уровень управления)
Fig. 4. Results of weight assessment of sub-criteria for selection of dump trucks by BWM method (2nd level of management)

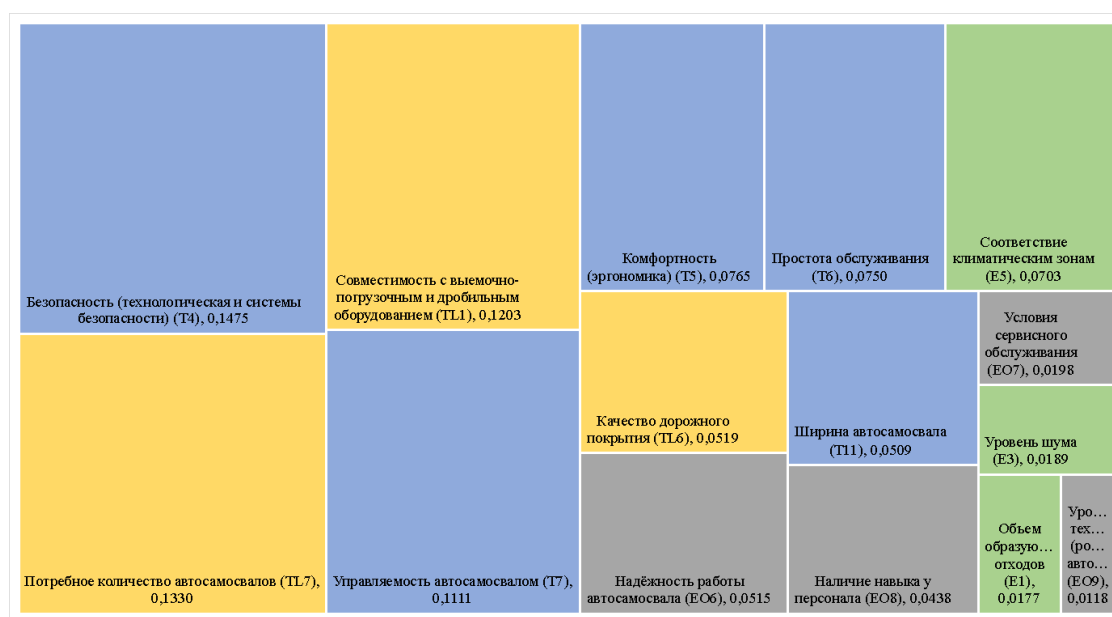


Рис. 5. Результаты оценки веса подкритериев выбора карьерных автосамосвалов методом BWM (3-й уровень управления)
Fig. 5. Results of weight assessment of sub-criteria for selection of dump trucks by BWM method (3rd level of management)



Рис. 6. Сравнение результатов расчёта весов подкритериев BWM и FUCOM
Fig. 6. Comparison of the sub-criteria weights calculation results by BWM and FUCOM

Оценки критериев и подкритериев не совпадали у экспертов всех уровней компетентности. Обсуждение полученных результатов с экспертами позволило установить причины таких различий. Выяснилось, что эксперты воспринимают критерии как целевые, а подкритерии – как ограничения, которые необходимо соблюдать в процессе достижения целевых критериев.

Например, эксперты 1-го уровня в качестве целевых критериев выделили Технологические критерии (TL), но технический подкритерий «Срок службы автосамосвалов» (T1) был выбран ими в качестве приоритетного локального критерия. Эксперты 2-го уровня выбрали в качестве целевых технические критерии (T), так как в своей деятельности они ориентированы на максимально эффективную работу техники. Однако те же эксперты отдали приоритет подкритерию «Тип и параметры месторождений» (E4) из группы природных и экологических критериев. Это объясняется тем, что оперативные решения этих экспертов определяются фактической конфигурацией рудного тела, которая может значительно отличаться от проектной. Оперативные корректировки усложняют текущее и оперативное планирование и поэтому воспринимаются этой группой экспертов как ограничения. Хотя эксперты уровня 3, как и ожидалось, отдали приоритет целевой группе технических критериев (T), они выбрали «Соответствие климатической зоне» (E5) из группы экологических подкритериев в качестве приоритетного локального критерия. Основная причина такого расхождения объясняется тем, что горнодобывающие предприятия, на которых работают опрошенные эксперты, расположены в суровых климатических условиях Российской Федерации и Республики Казахстан. Поэтому влияние климатических условий, в частности резких колебаний температуры окружающего воздуха, воспринимается экспертами данного уровня как факторы, усложняющие работу горного предприятия и снижающие надёжность и безопасность автосамосвалов.

Значения весов критериев для каждой группы экспертов являются результатом стремления к балансу между глобальными критериями и подкритериями-ограничениями. Например, технологический подкритерий «Производительность карьера» (TL5) получил максимальный вес у экспертов 1-го уровня, поскольку достижение целевых значений этого подкритерия является основным критерием эффективности экспертов этой группы. Аналогичное объяснение мы делаем и для результатов других групп экспертов. Подкритерий «Грузоподъёмность» (T9) получил максимальный глобальный вес в группе экспертов 2-го уровня, а подкритерий «Безопасность (технологическая и системы безопасности)» (T4) – у экспертов 3-го уровня.

Полученные результаты также объясняют частичное неподтверждение гипотезы о приоритетности тех или иных критериев среди экспертов определённого уровня. Это объясняется двумя причинами. Первая причина заключается в выборе конкретных экспертов. Например, состав экспертной группы 1-го уровня в нашем исследовании составили эксперты, не являющиеся собственниками горнодобывающих предприятий или топ-менеджерами. Поэтому в качестве целевых они выбрали технологические критерии, а не ожидаемую группу экономических или экологических критериев. Вторая причина заключается в двухуровневом характере предлагаемой нами системы критериев. Критерии с наибольшим локальным весом не входят в группу критериев, также имеющих наибольший вес среди экспертов всех уровней. Это также свидетельствует о различиях в оценке критериев и подкритериев. Критерии с максимальным глобальным весом определяются как компромиссные критерии, соответствие которым позволяет достичь целевых критериев при соблюдении ограничивающих подкритериев.

Мы сравнили результаты усреднения весов критериев с оценками экспертов разных уровней (рис. 7).

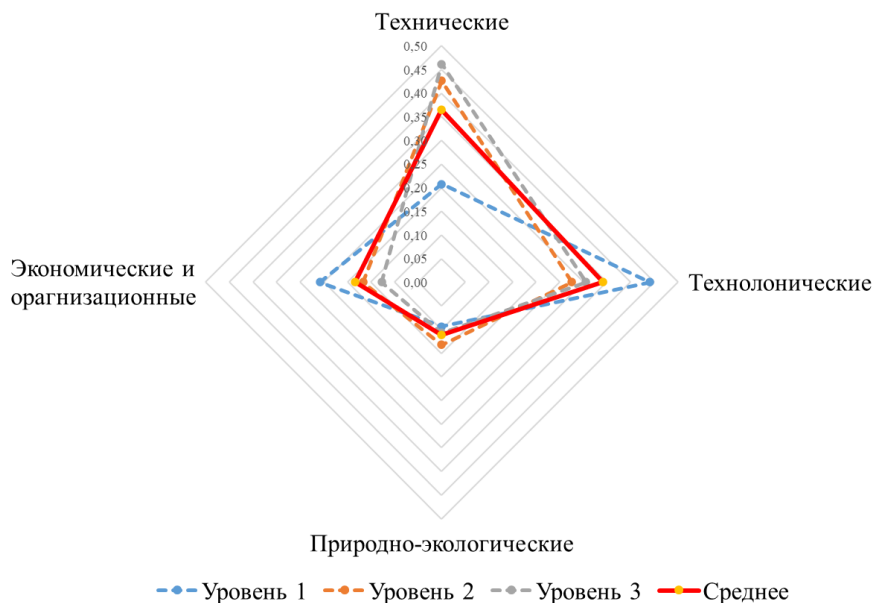


Рис. 7. Результат сравнения среднего веса критериев с оценками разных экспертов

Fig. 7. Result of comparing the average weight of the criteria with the assessments of different experts

Средние значения в основном совпадают с результатами оценок экспертов 2-го и 3-го уровней. Однако эксперты 1-го уровня по-разному оценили экономические и организационные и технологические критерии. Эксперты 1-го уровня отдали приоритет технологическим критериям (вес $TL=0,4411$) и экономическим и организационным критериям (вес $EO=0,2579$), в то время как эксперты 2-го и 3-го уровней наиболее высоко оценили значимость технических критериев (соответственно вес $T=0,4256$ и $T=0,4610$). Полученный результат объясняется особенностью организации труда на исследуемых карьерах, когда непосредственные исполнители (стратегические на уровне 2 и оперативные на уровне 3) ориентируются на требования руководителей, преследующих разные, часто противоположные, цели.

Заключение

Анализ полученных результатов позволил сделать вывод о продуктивности предложенной методики формирования системы критериев выбора автосамосвалов. Парк автосамосвалов является важнейшим элементом сложной горнотехнической системы. Основной особенностью методики является двухуровневая система критериев, вес которых определяются экспертами трех разных уровней

компетентности. Применение предложенной методики для условий конкретного горнодобывающего предприятия позволит определить критерии выбора модели автосамосвала с учётом влияния как глобальных факторов, так и специфических условий эксплуатации автосамосвалов на конкретном предприятии.

Предлагаемый подход к выбору модели автосамосвала для карьера имеет два основных отличия от традиционного технико-экономического сравнения вариантов. Во-первых, в традиционном методе экономические критерии имеют наивысший приоритет. Социальные и экологические показатели вариантов рассматриваются как ограничения. Во-вторых, рассматривается ограниченное количество технических и технологических критериев. Набор таких критериев в каждом конкретном случае носит субъективный характер. Предлагаемая универсальная система критериев и методика разработки и корректировки такой системы учитывает все известные на сегодняшний день критерии и факторы, определяющие выбор модели автосамосвала для карьера. Кроме того, использование обоснованных в статье рангов критериев позволяет минимизировать влияние субъективного фактора при оценке и выборе моделей автосамосвалов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Галкин В.И., Шешко Е.Е. Возможность применения различных типов ленточных конвейеров при циклично-поточной технологии глубоких карьеров // Горная промышленность. – 2023. – № 4. – С. 117–122. DOI: 10.30686/1609-9192-2023-4-117-122.
2. Оценка дорожных условий Олимпиадинского и Благодатного ГОКов / А. Журавлев, В. Черепанов, В. Карпов, А. Неужин // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2023. – № 3. – С. 25–37. DOI: 10.21440/0536-1028-2023-4-25-37.

3. Хазин М.Л. Направления развития карьерного автотранспорта // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2021. – Т. 21. – № 3. – С. 144–150. DOI: 10.15593/2712-8008/2021.3.7.
4. Кузнецов Д.В., Одаев Д.Г., Линьков Я.Е. Особенности выбора технологического автотранспорта для разработки глубоких карьеров Севера // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2017. – № 5. – С. 54–65.
5. Kuznetsov D.V., Kosolapov A.I. Justification criteria for open pit mine depth and mining/haulage machinery parameters // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2019. – Vol. 262. – P. 12038. DOI: 10.1088/1755-1315/262/1/012038.
6. Paricheh M., Osanloo M. Determination of the optimum in-pit crusher location in open-pit mining under production and operating cost uncertainties // 6th International Conference on Computer Applications in the Minerals Industries. – Istanbul, Turkey, 5–7 October 2016. – P. 1–7.
7. Кулешов А.А. Способы повышения качества функционирования систем карьерного автотранспорта в современных условиях // Записки Горного института. – 2004. – № 157. – С. 181–185.
8. Яковлев В.Л., Корнилов С.В. Геотехнологические проблемы и особенности ведения горных работ на глубоких карьерах // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2015. – № 5. – С. 54–66.
9. Грачев А. БелАЗ-7558Н – первый в мире 90-тонный самосвал на сжиженном природном газе // Горный журнал. – 2023. – № 11. – С. 122–123.
10. Обзор транспорта с электропитанием в фокусе развития горнодобывающих предприятий / В. Черепанов, А. Журавлев, И. Глебов, М. Чендырев // Проблемы недропользования. – 2019. – Т. 20. – № 1. – С. 33–49. DOI: 10.25635/2313-1586.2019.01.033.
11. Braun T., Hennig A., Lottermoser B.G. The need for sustainable technology diffusion in mining: achieving the use of belt conveyor systems in the German hard-rock quarrying industry // Journal of Sustainable Mining. – 2017. – Vol. 16. – № 1. – P. 24–30.
12. Применение задачи о брахистохроне в исследовании траектории спуска сосуда на открытых горных работах / В.С. Великанов, Н.В. Дёрина, Ю.В. Кочержинская, Н.В. Мамай, Т.В. Логунова // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2022. – Т. 20. – № 4. – С. 5–14. DOI: 10.18503/1995-2732-2022-20-4-5-14.
13. Zimmermann E., Kruse W. Mobile crushing and conveying in quarries cheaper production! URL: <https://www.911metallurgist.com/blog/wp-content/uploads/2015/12/mobile-crushing.pdf> (дата обращения 20.03.2024).
14. Robotic transport complex of automotive vehicles for handling of rock mass at the process of open cast mining / A. Kolga, A. Rakhmangulov, N. Osintsev, A. Sladkowski, I. Stolpovskikh // Transport Problems. – 2015. – Vol. 10. – № 2. – P. 109–116.
15. Ultimate pit optimization with environmental problem for open-pit coal mine / X. Xu, X. Gu, Q. Wang, Y. Zhao, Z. Zhu, F. Wang, Z. Zhang // Process Safety and Environmental Protection. – 2023. – Vol. 173. – P. 366–372. DOI: 10.1016/j.psep.2023.03.024.
16. Golik V.I., Polovneva S.I., Turluyev R.R. Processing and use of waste from the mining industry // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2022. – Vol. 1021. – № 1. – P. 12004. DOI: 10.1088/1755-1315/1021/1/012004.
17. Argimbaev K.R. Investigations of the deposit geological structure impact on the technogenic accident risk at the mining plant // Journal of Engineering and Applied Sciences. – 2018. – Vol. 18. – № 7. – P. 1713–1717. DOI: 10.36478/jeasci.2018.1713.1717.
18. Хазин М.Л., Тарасов А.П. Эколого-экономическая оценка карьерных троллейзов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2018. – Т. 17. – № 2. – С. 166–180. DOI: 10.15593/2224-9923/2018.2.6.
19. Rakhmangulov A., Burmistrov K., Osintsev N. Multi-criteria system's design methodology for selecting open pits dump trucks // Sustainability. – 2024. – Vol. 16. – № 2. – P. 863. DOI: 10.3390/su16020863.
20. Justification of efficiency of heavy dump trucks effectiveness in open pit mines according to operating life criterion of the back axle / I. Panachev, G. Shirokolobov, I. Kuznetsov, A. Shirokolobova // Coal in the 21st Century: Mining, Processing, Safety: 8th Russian-Chinese Symposium. – Kemerovo, Russia: Atlantis Press, 2016. – P. 144–148. DOI: 10.2991/coal-16.2016.29.
21. 8 Q&A You need to know about dump truck. URL: <https://www.miningpedia.cn/mining/8-Q-A-You-Need-to-Know-about-Dump-Truck.html#section7> (дата обращения 20.03.2024).
22. 3 factors to consider when choosing dump trucks for your project. URL: <https://connect2local.com/l/48162/c/163549/3-factors-to-consider-when-choosing-dump-trucks-for-your-project> (дата обращения 20.03.2024).
23. Rezaei J. Best-worst multi-criteria decision-making method // Omega. – 2015. – Vol. 53. – P. 49–57. DOI: 10.1016/j.omega.2014.11.009.
24. Rezaei J. Best-Worst multi-criteria decision-making method: some properties and a linear model // Omega. – 2016. – Vol. 64. – P. 126–130. DOI: 10.1016/j.omega.2015.12.001.
25. Pamucar D., Stevic Z., Sremac S. A new model for determining weight coefficients of criteria in MCDM models: Full Consistency Method (FUCOM) // Symmetry. – 2018. – Vol. 10. – № 9. – P. 393. DOI: 10.3390/sym10090393.

Информация об авторах

Константин Владимирович Бурмистров, доктор технических наук, профессор кафедры разработки месторождений полезных ископаемых, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Россия, 455000, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38; k.burmistrov@magtu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3433-133X>

Никита Анатольевич Осинцев, кандидат технических наук, доцент кафедры логистики и управления транспортными системами, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Россия, 455000, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38; osintsev@magtu.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1168-6725>

Александр Нельевич Рахмангулов, доктор технических наук, профессор кафедры логистики и управления транспортными системами, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Россия, 455000, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38; ran@magtu.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7862-4743>

Маргар Аветикович Багдасарян, аспирант кафедры разработки месторождений полезных ископаемых, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Россия, 455000, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38; mbaga2012@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0003-4872-2398>

Поступила в редакцию: 26.07.2024

Поступила после рецензирования: 23.09.2024

Принята к публикации: 21.04.2025

REFERENCES

1. Galkin V.I., Sheshko E.E. The possibility of using various types of belt conveyors, with the cyclic-flow technology of deep open pits. *Mining Industry Journal*, 2023, no. 4, pp. 117–122. (In Russ.) DOI: 10.30686/1609-9192-2023-4-117-122.
2. Zhuravlev A.G., Cherepanov V.A., Karpov V.A., Nevezhin A.Yu. Assessing the road conditions of the Olimpiada and Blagodatny mining and processing plants. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal*, 2023, no. 3, pp. 25–37. (In Russ.) DOI: 10.21440/0536-1028-2023-4-25-37.
3. Khazin M.L. Directions of career transport development. *Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering*, 2021, vol. 21, no. 3, pp. 144–150. (In Russ.) DOI: 10.15593/2712-8008/2021.3.7.
4. Kuznetsov D.V., Odaev D.G., Linkov Y.E. Peculiarities of technological motor transport selection used for deep north open pits operation. *Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)*, 2017, no. 5, pp. 54–65. (In Russ.)
5. Kuznetsov D.V., Kosolapov A.I. Justification criteria for open pit mine depth and mining/haulage machinery parameters. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019, vol. 262, p. 12038. DOI: 10.1088/1755-1315/262/1/012038.
6. Paricheh M., Osanloo M. Determination of the optimum in-pit crusher location in open-pit mining under production and operating cost uncertainties. *6th International Conference on Computer Applications in the Minerals Industries*. Istanbul, Turkey, 5–7 October 2016. pp. 1–7.
7. Kuleshov A.A. Ways to improve the quality of operation of quarry road transport systems in modern conditions. *Journal of Mining Institute*, 2004, no. 157, pp. 181–185. (In Russ.)
8. Yakovlev V.L., Kornilkov S.V. Technological problems and features of conducting mining operations in deep open pits. *Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)*, 2015, no. S56, pp. 54–66. (In Russ.)
9. Grachev A. BELAZ-7558 N – the world's first 90-ton dump truck running on liquefied natural gas. *Gornyi Zhurnal*, 2023, no. 11, pp. 122–123 (In Russ.)
10. Cherepanov V.A., Zhuravlev A.G., Glebov I.A., Chendyrev M.A. Overview of transport with rower supply in focus of mining industry development. *Problems of Subsoil Use*, 2019, vol. 20, no. 1, pp. 33–49. (In Russ.) DOI: 10.25635/2313-1586.2019.01.033.
11. Braun T., Hennig A., Lottermoser B.G. The need for sustainable technology diffusion in mining: Achieving the use of belt conveyor systems in the German hard-rock quarrying industry. *Journal of Sustainable Mining*, 2017, vol. 16, no. 1, pp. 24–30.
12. Velikanov V.S., Dyorina N.V., Kocherzhinskaya Y.V., Mamay N.V., Logunova T.V. The brachistochrone problem applied in the study on a conveyance descending trajectory in open pit mining. *Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University*, 2022, vol. 20, no. 4, pp. 5–14. (In Russ.) DOI: 10.18503/1995-2732-2022-20-4-5-14.
13. Zimmermann E., Kruse W. *Mobile crushing and conveying in quarries cheaper production!* Available at: <https://www.911metallurgist.com/blog/wp-content/uploads/2015/12/mobile-crushing.pdf>. (accessed 20 March 2024).
14. Kolga A., Rakhmangulov A., Osintsev N., Śladowski A., Stolpovskikh I. Robotic transport complex of automotive vehicles for handling of rock mass at the process of open cast mining. *Transport Problems*, 2015, vol. 10, no. 2, pp. 109–116.
15. Xu X., Gu X., Wang Q., Zhao Y., Zhu Z., Wang F., Zhang Z. Ultimate pit optimization with environmental problem for open-pit coal mine. *Process Safety and Environmental Protection*, 2023, vol. 173, pp. 366–372. DOI: 10.1016/j.psep.2023.03.024.
16. Golik V.I., Polovneva S.I., Turluyev R.R. Processing and use of waste from the mining industry. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2022, vol. 1021, no. 1, pp. 12004. DOI: 10.1088/1755-1315/1021/1/012004.
17. Argimbaev K.R. Investigations of the deposit geological structure impact on the technogenic accident risk at the mining plant. *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2018, vol. 18, no. 7, pp. 1713–1717. DOI: 10.36478/jeasci.2018.1713.1717.
18. Khazin M., Tarasov A. Ecological and economic evaluation of quarry trolley trucks. *Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering*, 2018, vol. 17, no. 2, pp. 166–180. (In Russ.) DOI: 10.15593/2224-9923/2018.2.6.
19. Rakhmangulov A., Burmistrov K., Osintsev N. Multi-criteria system's design methodology for selecting open pits dump trucks. *Sustainability*, 2024, vol. 16, no. 2, pp. 863. DOI: 10.3390/su16020863.
20. Panachev I., Shirokolobov G., Kuznetsov I., Shirokolobova A. Justification of efficiency of heavy dump trucks effectiveness in open pit mines according to operating life criterion of the back axle. *8th Russian-Chinese Symposium. Coal in the 21st Century: Mining, Processing, Safety*. Kemerovo, Russia: Atlantis Press, 2016. pp. 144–148. DOI: 10.2991/coal-16.2016.29.
21. 8 Q&A you need to know about dump truck. Available at: <https://www.miningpedia.cn/mining/8-Q-A-You-Need-to-Know-about-Dump-Truck.html#section7> (accessed 20 March 2024).
22. 3 factors to consider when choosing dump trucks for your project. Available at: <https://connect2local.com/l/48162/c/163549/3-factors-to-consider-when-choosing-dump-trucks-for-your-project> (accessed 20 March 2024).
23. Rezaei J. Best-worst multi-criteria decision-making method. *Omega*, 2015, vol. 53, pp. 49–57. DOI: 10.1016/j.omega.2014.11.009.

24. Rezaei J. Best-Worst multi-criteria decision-making method: some properties and a linear model. *Omega*, 2016, vol. 64, pp. 126–130. DOI: 10.1016/j.omega.2015.12.001.
25. Pamucar D., Stevic Z., Sremac S. A new model for determining weight coefficients of criteria in MCDM models: Full Consistency Method (FUCOM). *Symmetry*, 2018, vol. 10, no. 9, pp. 393.

Information about the authors

Konstantin V. Burmistrov, Dr. Sc., Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, 38, Lenin avenue, Magnitogorsk, 455000, Russian Federation; k.burmistrov@magtu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3433-133X>

Nikita A. Osintsev, Cand. Sc., Associate Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, 38, Lenin avenue, Magnitogorsk, 455000, Russian Federation; osintsev@magtu.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1168-6725>

Aleksandr N. Rakhmangulov, Dr. Sc., Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, 38, Lenin avenue, Magnitogorsk, 455000, Russian Federation; ran@magtu.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7862-4743>

Margar A. Bagdasaryan, Postgraduate Student, Nosov Magnitogorsk State Technical University, 38, Lenin avenue, Magnitogorsk, 455000, Russian Federation; mbaga2012@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0003-4872-2398>

Received: 26.07.2024

Revised: 23.09.2024

Accepted: 21.04.2025

УДК 621.365.5 (622.276.72)
DOI: 10.18799/24131830/2025/7/4791
Шифр специальности ВАК: 1.6.9, 2.8.4
Научная статья

Моделирование прогрева прискважинной зоны пласта с помощью индукционного нагревателя

Д.В. Космылин, В.Я. Федотов, Ф.Ф. Давлетшин✉, Р.Ф. Шарафутдинов, Р.А. Валиуллин

Уфимский университет науки и технологии, Россия, г. Уфа

✉felix8047@mail.ru

Аннотация. Актуальность. При добыче и транспортировке тяжелой нефти в прискважинной зоне пласта и в стволе скважины происходит выпадение асфальтосмолопарафиновых отложений, оказывающих негативное влияние на эффективность разработки нефтяных месторождений. Рассмотрен перспективный способ очистки прискважинной зоны пласта от асфальтосмолопарафиновых отложений с помощью индукционного нагревателя. **Цель.** Изучение особенностей теплового поля в прискважинной зоне пласта, создаваемого за счет индукционного нагрева обсадной колонны в скважине. **Методы.** Численное математическое моделирование тепловых процессов в прискважинной зоне пласта в процессе индукционного нагрева; экспериментальное исследование теплового поля на физической модели скважины с индукционным нагревателем. **Результаты и выводы.** Предложена математическая модель для расчета нестационарного температурного поля в прискважинной зоне пласта в процессе индукционного нагрева обсадной колонны. Построены модельные кривые динамики во времени температуры на стенке обсадной колонны и в прискважинной зоне пласта. На примере периодического индукционного воздействия с циклами включения и остановки работы нагревателя, показано, что радиус распространения теплового возмущения в пласте за 12-часовой период воздействия составляет более 0,5 м. Установлено, что разогрев пласта величиной более 5 градусов Цельсия достигается в прискважинной области пласта радиусом 0,2–0,3 м в зависимости от теплопроводности горных пород. Выполнены экспериментальные исследования формирования теплового поля в физической модели скважины с индукционным нагревателем. Показано, что разогрев пласта величиной более 1 градуса Цельсия достигается в диапазоне радиуса до 0,25 м. Результаты численных и экспериментальных исследований показывают возможность использования индукционного нагрева для очистки ближней (прискважинной) зоны пласта от асфальтосмолопарафиновых отложений.

Ключевые слова: асфальтосмолопарафиновые отложения, индукционный нагреватель, прискважинная зона пласта, физическая модель скважины, численное моделирование, радиус прогрева пласта

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда по теме «Разработка инновационной технологии на основе метода активной термометрии для решения задач экологии пресноводных горизонтов» (проект № 23-17-20017).

Для цитирования: Моделирование прогрева прискважинной зоны пласта с помощью индукционного нагревателя / Д.В. Космылин, В.Я. Федотов, Ф.Ф. Давлетшин, Р.Ф. Шарафутдинов, Р.А. Валиуллин // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 7. – С. 45–55. DOI: 10.18799/24131830/2025/7/4791

UDC 621.365.5 (622.276.72)
DOI: 10.18799/24131830/2025/7/4791
Scientific paper

Modeling the heating of the reservoir near-wellbore zone using an induction heater

D.V. Kosmylin, V.Ya. Fedotov, F.F. Davletshin✉, R.F. Sharafutdinov, R.A. Valiullin

Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russian Federation

✉felix8047@mail.ru

Abstract. Relevance. During heavy oil extraction and transportation in the near-wellbore zone of the reservoir and the well-head, deposits occur. They have a negative impact on the efficiency of oil field development. The paper considers a promising method for cleaning the near-wellbore zone of the reservoir from wax deposits using an induction heater. **Aim.** To study the features of the thermal field in the near-wellbore zone of the reservoir created by induction heating of the casing in the well. **Methods.** Numerical mathematical modeling of thermal processes in the near-wellbore zone of the reservoir during induction heating; experimental study of the thermal field on a physical model of a well with an induction heater. **Results and conclusions.** The authors have proposed the mathematical model for calculating non-stationary temperature field in the near-wellbore zone of the reservoir during induction heating of the casing. Model curves of temperature dynamics over time on the casing wall and in the near-wellbore zone of the reservoir are computed. Using the example of periodic induction exposure, including cycles of operation on and shutdown the heater, it is shown that the radius of propagation of thermal disturbance in the reservoir over a 12-hour exposure period is more than 0.5 m. It was found that the reservoir heating with a value of more than 5 degrees Celsius is achieved in the near-wellbore zone of the reservoir with a radius of 0.2–0.3 m, depending on the thermal conductivity of the rocks. The authors performed the experimental studies of a thermal field in a physical model of a well with an induction heater. It is shown that the reservoir heating with a value of more than 1 degree Celsius is achieved in the radius range up to 0.25 m. The results of numerical and experimental studies show the possibility of using induction heating to clean the near-wellbore zone of the reservoir from wax deposits.

Keywords: wax deposits, induction heater, near-wellbore zone, physical model of the well, numerical modeling, radius of reservoir heating

Acknowledgements: The work was carried out with the financial support of the Russian Science Foundation on the topic "Development of innovative technology based on the method of active thermometry for solving problems of ecology of freshwater horizons" (project no. 23-17-20017).

For citation: Kosmylin D.V., Fedotov V.Ya., Davletshin F.F., Sharafutdinov R.F., Valiullin R.A. Modeling the heating of the reservoir near-wellbore zone using an induction heater. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 7, pp. 45–55. DOI: 10.18799/24131830/2025/7/4791

Введение

На сегодняшний день в нефтегазовой отрасли происходит рост объемов добычи трудноизвлекаемых запасов тяжелой нефти, связанный с постепенной выработкой запасов легких углеводородов, вступлением месторождений в позднюю стадию разработки. В этих условиях проблема, связанная с образованием асфальтосмолопарафиновых отложений (АСПО), становится еще более актуальной [1, 2]. АСПО представляют собой высокомолекулярные соединения, выпадающие в твердый осадок при определенных баротермических условиях, в частности при снижении температуры ниже температуры насыщения парафином [3, 4]. Причины, ведущие к выпадению АСПО в прискважинной (призабойной) зоне продуктивных пластов и в стволе скважин, а также механизмы образования отложений подробно рассмотрены в работах [5–9].

Методы борьбы с АСПО можно объединить в две основные группы. Первая группа включает различные технологии, в рамках которых в скважине создаются условия, предупреждающие выпадение АСПО в целом. Во вторую группу входят методы, позволяющие удалить из скважины уже образовавшиеся органические отложения [10, 11]. Широкое распространение в нефтепромысловой практике получили химические методы, предполагающие проведение промывок скважины специальным растворителем (ингибитором АСПО), причем в зависимости от применяемой технологии осуществляется как закачка растворителя в прискважинную зону пласта

(одно- или многократная обработка), так и непрерывная подача реагента в скважину с помощью специальных трубок [12, 13]. Также распространенными являются механические методы, основанные на очистке внутренней поверхности трубопроводов, насосных труб с помощью специальных скребков [14], и физические методы, основанные на воздействии акустических, электромагнитных и прочих физических полей [15, 16]. Отдельно можно отметить тепловые методы, в основу которых легла способность парафинов плавиться при превышении температуры насыщения нефти парафином, например, за счет использования специальных греющих кабелей, закачки горячего пара, воды или нефти. Каждый из способов борьбы с АСПО имеет свои достоинства и недостатки. Например, химические методы позволяют удалять АСПО как из прискважинной зоны пласта, так и из ствола скважины, однако эффективность химического метода во многом зависит от правильного подбора реагента с учетом состава АСПО, обеспечения требуемой концентрации реагента для растворения отложений. Достоинствами механических методов является простота и относительная дешевизна, однако они не позволяют выполнять обработку прискважинной зоны пласта. Эффективность тепловых методов зачастую снижается за счет тепловых потерь по пути движения теплоносителя от устья скважины к интервалу обработки в пласте [17].

В данной работе рассмотрена возможность использования технологии индукционного нагрева

для очистки прискважинной зоны продуктивного пласта. В металлической обсадной (эксплуатационной) колонне за счет индукционного нагревателя создается вихревое электрическое поле, обуславливающее протекание вихревых токов и выделение теплоты в колонне по закону Джоуля–Ленца [18]. Далее тепло от нагретой колонны передается цементному кольцу и окружающим горным породам за счет теплопроводности, что позволяет локально увеличить температуру прискважинной зоны пласта и тем самым создать условия для растворения (плавления) АСПО. Применение технологии индукционного нагрева при обработке реальных скважин, осложненных АСПО, показало эффективность метода: по результатам обработки более 70 скважин получено увеличение дебита скважин по жидкости в среднем в 1,8 раза, причем длительность эффекта составила более 400 дней [19]. Эффективность технологии индукционного воздействия в значительной степени зависит от мощности нагревателя, длительности индукционного воздействия. Целью настоящего исследования является изучение особенностей формирования теплового поля в прискважинной зоне пласта при индукционном воздействии, оценка глубины проникновения тепла в пласт и величины температурной аномалии в пласте, создаваемой за счет индукционного нагрева.

Следует отметить, что возможности индукционного нагрева не ограничиваются тепловой обработкой скважин. При контакте с нагретым участком колонны тепло передается потокам жидкости, находящимся внутри колонны и за колонным пространстве. В движущейся жидкости создаются тепловые метки, регистрация которых позволяет решать важные задачи диагностики состояния скважин и пластов, например, определения заколонных перетоков, интервалов притока жидкости из пласта [20].

Численное математическое моделирование теплового поля в прискважинной зоне пласта

С целью оценки глубины проникновения в пласт теплового возмущения, связанного с индукционным нагревом обсадной колонны, рассмотрена математическая модель, описывающая температурное поле в скважине и околоскважинном пространстве в процессе индукционного нагрева. Геометрия моделируемой области показана на рис. 1, она включает участок металлической обсадной трубы, внутри которой находится жидкость. Снаружи обсадная труба контактирует с цементным кольцом, причем труба и цементное кольцо расположены концентрично относительно друг друга. Во внешнем пространстве скважины расположен однородный круговой пласт.

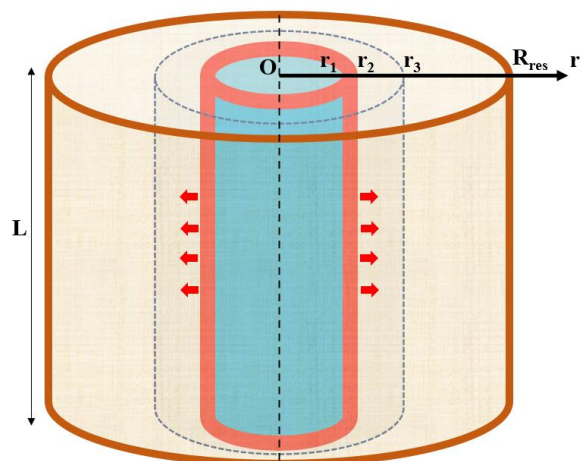


Рис. 1. Геометрия модели (O – ось симметрии, r – радиус, r_1 – r_2 – обсадная колонна, r_2 – r_3 – цементное кольцо, r_3 – R_{res} – горные породы, L – длина участка нагрева, стрелками показано направление теплового потока к пласту)

Fig. 1. Geometry of the model (O is the axis of symmetry, r is the radius, r_1 – r_2 is the casing, r_2 – r_3 is the cement ring, r_3 – R_{res} are rocks, L is the length of the heating section, the arrows show the direction of the heat flow to the reservoir)

В расчетах полагается, что тепловыделение равномерно происходит вдоль участка нагрева L , при этом моделируется процесс радиального теплопереноса от нагретой колонны цементному кольцу и далее окружающую скважину горным породам.

В области 1 (обсадная колонна) решается уравнение теплопроводности с учетом выделения тепла за счет скважинного индукционного нагревателя. В качестве граничного условия слева задается теплообмен между колонной и жидкостью внутри нее, определяемый законом Ньютона–Рихмана, на границе колонны с цементным кольцом задается условие равенства температур и тепловых потоков [21, 22]

$$\begin{aligned} \frac{\partial T_1}{\partial t} &= a_1 \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T_1}{\partial r} \right) + q, r_1 < r < r_2; \\ \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial r} \Big|_{r=r_1} &= \alpha (T_{\text{fl}} - T_1); \\ T_1 \Big|_{r=r_2} &= T_2 \Big|_{r=r_2}; \\ \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial r} \Big|_{r=r_2} &= \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial r} \Big|_{r=r_2}, \end{aligned} \quad (1)$$

где t – время, r – радиус, T_1 – температура в колонне, λ_1 , a_1 – теплопроводность и температуропроводность материала колонны (сталь) соответственно, q – удельная мощность тепловыделения на единицу объема колонны, определяемая как отношение мощности тепловыделения в колонне P к объему участка колонны длиной L , r_1 , r_2 – внутренний

и внешний радиусы колонны соответственно, T_f – температура жидкости в стволе скважины, α – коэффициент теплоотдачи.

Коэффициент теплоотдачи α рассчитывается согласно зависимости

$$\alpha = \frac{Nu_f \lambda_f}{d}, \quad (2)$$

где Nu_f – число Нуссельта естественной конвекции, λ_f – теплопроводность жидкости в обсадной колонне, d – эффективный гидравлический диаметр, определяемый как разница между внутренним диаметром обсадной колонны и внешним диаметром корпуса индуктора. Изменением температуры жидкости и корпуса индуктора по сравнению с изменением температуры колонны пренебрегается.

В области 2 (цементное кольцо) и 3 (горные породы) также решается уравнение теплопроводности, но без теплового источника, на границе между цементом и горными породами задается условие равенства температур и тепловых потоков. На внешней границе модели температура горных пород принимается равной пластовой, начальная температура во всех точках модели также принимается равной пластовой

$$\begin{aligned} \frac{\partial T_2}{\partial t} &= a_2 \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T_2}{\partial r} \right), r_2 < r < r_3; \\ \frac{\partial T_3}{\partial t} &= a_3 \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T_3}{\partial r} \right), r_3 < r < R_{res}; \\ T_2|_{r=r_3} &= T_3|_{r=r_3}; \\ \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial r} \Big|_{r=r_3} &= \lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial r} \Big|_{r=r_3}; \\ T_3|_{r=R_{res}} &= T_{res}; \\ T|_{t=0} &= T_{res}, \end{aligned} \quad (3)$$

где T_2 , T_3 – температура в цементе и горных породах соответственно; λ_2 , λ_3 – теплопроводность цемента и горных пород соответственно; a_2 , a_3 – температуропроводность цемента и горных пород соответственно; r_3 – наружный радиус цементного кольца; R_{res} – радиус внешней границы модели; T_{res} – пластовая температура.

При известной теплопроводности среды (колонна, цемент, горные породы) λ , плотности ρ и удельной теплоемкости c ее температуропроводность определяется согласно зависимости

$$a = \frac{\lambda}{c\rho}. \quad (4)$$

Система уравнений (1), (3) с учетом выражений (2) и (4) решается численно. Для дискретизации

расчетной области используется метод контрольных объемов, дискретный аналог уравнений решается методом одномерной прогонки [23].

При моделировании приняты следующие значения параметров: внутренний и внешний радиусы обсадной колонны 130 и 147 мм соответственно, внешний радиус цементного кольца 216 мм, радиус внешней границы модели 10 м, теплопроводность областей 1, 2, 3 (стальной обсадной трубы, цемента, горных пород) 50, 1,2, 2 Вт/(м·К) соответственно, плотность – 7800, 2600, 2500 кг/м³ соответственно, удельная теплоемкость – 500, 840, 1000 Дж/(кг·К) соответственно, мощность индукционного нагревателя 2 кВт, длина участка нагрева 0,4 м [24]. Рассматривается периодическое воздействие на прискважинную зону пласта, включающее чередование циклов нагрева и остановки длительностью по 30 мин. Воздействие носит циклический характер, чтобы избежать чрезмерно высоких нагрузок на индуктор и питающий кабель.

На рис. 2 представлены модельные кривые динамики температуры нагреваемой стенки колонны, а также на расстояниях 0,1 и 0,25 м от стенки (0,17 и 0,32 м от оси скважины соответственно) в течение 12 циклов индукционного воздействия длительностью по 1 часу каждое (30 мин нагрева + 30 мин остановки). Изменение температуры колонны относительной начальной ΔT (разогрев колонны) после 12 циклов нагрева – порядка 50 °С, на расстоянии 0,1 м от стенки горные породы греются на величину 17 °С, на расстоянии 0,25 – на величину около 5 °С. Разогрев колонны имеет немонотонный характер – темп роста температуры снижается с течением времени по мере роста температуры колонны, что обусловлено увеличением интенсивности передачи тепла окружающим скважину породам и жидкости, находящейся внутри колонны. Расчетная величина амплитуды колебаний температуры колонны в процессе нагрева достигает 20 °С. В прискважинной зоне пласта колебания температуры существенно ниже, температура во времени растет практически линейно, причем рост температуры в наблюдаемой точке пласта начинается с момента достижения температурным возмущением этой точки. Например, на расстоянии 25 см от стенки обсадной колонны заметный рост температуры в пласте отмечается через 200 мин (3,3 часа) после начала индукционного воздействия, а разогрев величиной более 1 °С достигается только через 290 мин (около 5 часов).

На рис. 3 показаны кривые распределения температуры в прискважинной зоне пласта после окончания 2-го, 6-го и 12-го циклов нагрева. Видно, что с течением времени происходит постепенное распространение теплового возмущения в пласт за счет теплопроводности.

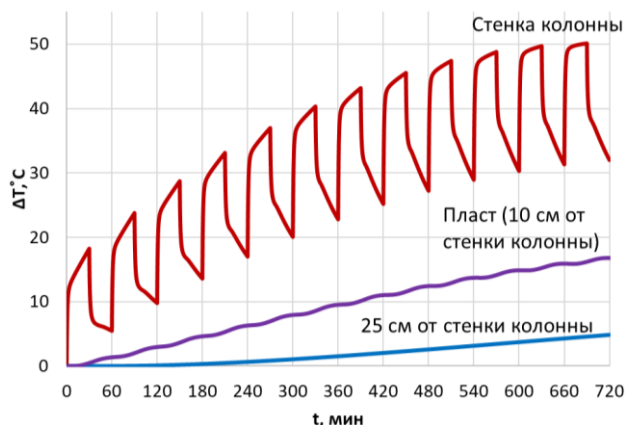


Рис. 2. Динамика температуры колонны и прискважинной зоны пласта в процессе индукционного воздействия

Fig. 2. Temperature dynamics of the casing and the near-wellbore zone of the reservoir during induction heating

Радиус распространения теплового возмущения в пласте за 12-часовой период воздействия достигает более 0,5 м. Если задаться конкретной величиной ΔT_n , обеспечивающей достижение температуры в пласте выше температуры плавления АСПО и соответственно плавление твердых парафиновых отложений, можно определить эффективный радиус области (зоны) очистки пласта. Например, при $\Delta T_n = 5^\circ\text{C}$ радиус зоны очистки составляет около 0,12 м для 2 циклов воздействия, 0,23 м для 6 циклов, 0,31 м для 12 циклов. Если требуемая величина разогрева пласта является небольшой, например, $\Delta T_n = 1^\circ\text{C}$, радиус зоны очистки составляет уже 0,19, 0,35, 0,47 м для 2, 6, 12 циклов индукционного воздействия соответственно.

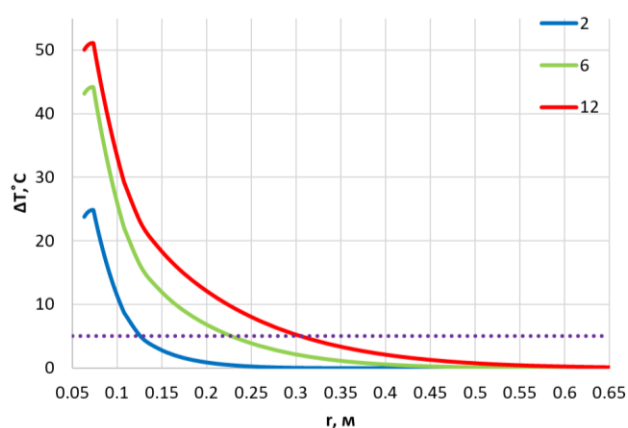


Рис. 3. Распределение температуры в прискважинной зоне пласта после 2, 6, 12 циклов нагрева соответственно (шифр кривых – количество циклов нагрева, точками отмечена линия $\Delta T = 5^\circ\text{C}$)

Fig. 3. Temperature distribution in the near-wellbore zone of the reservoir after 2, 6, 12 heating cycles, respectively (the key of the curves is the number of heating cycles, the dots mark the line $\Delta T = 5^\circ\text{C}$)

Теплопроводность (и соответственно температуропроводность) пород может в целом меняться в довольно широких пределах, что в общем оказывает влияние и на радиус распространения теплового возмущения в пласте [25]. Результаты моделирования (рис. 4) показали, что при варьировании теплопроводности в интервале 0,5–5 Вт/(м·К) эффективный радиус очистки пласта (при $\Delta T_n = 5^\circ\text{C}$) меняется незначительно, от 0,24 до 0,33 м; при $\Delta T_n = 1^\circ\text{C}$ он меняется в интервале 0,32–0,47 м.

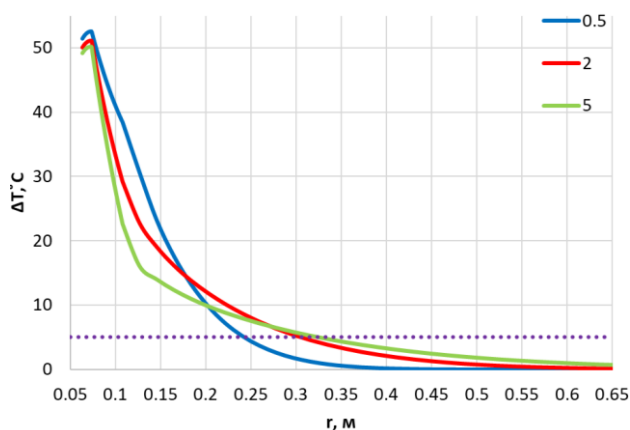


Рис. 4. Распределение температуры в прискважинной зоне пласта после 12 циклов нагрева (шифр кривых – теплопроводность горных пород, Вт/(м·К); точками отмечена линия $\Delta T = 5^\circ\text{C}$)

Fig. 4. Temperature distribution in the near-wellbore zone of the reservoir after 12 heating cycles (curve cipher – thermal conductivity of rocks (W/(m·K); dots mark the line $\Delta T = 5^\circ\text{C}$)

Экспериментальная установка (физическая модель скважины)

Совместно с численными расчетами выполнены экспериментальные исследования с использованием физической модели скважины. Физическая модель включает стальную трубу (обсадная труба) с наружным диаметром 147 мм и внутренним диаметром 130 мм. Труба установлена в центре металлической емкости (размеры 125×125×200 см), загерметизирована с торцов при помощи сварки, а также оборудована гидравлической системой для возможности включения движения жидкости внутри трубы (аналог работающей скважины). Для реализации гидравлической системы у верхнего и нижнего торцов трубы сделаны отверстия, подключены и герметично заизолированы шланги. Наружное пространство трубы засыпано сухим песком с последующей трамбовкой, служащим моделью пласта (рис. 5). Для измерения распределения температуры в песок с равным шагом установлены медные трубки, в которые с шагом 5 см помещены термочувствительные элементы – термодатчики К-

типа (КХТА 01.02). Регистрация изменения температурного поля в модели базируется на измерительном модуле NI9214, позволяющем одновременно подключать до 16 термопар.

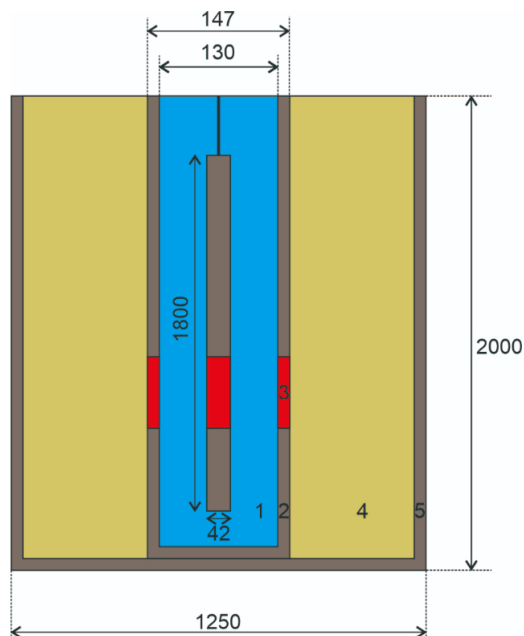


Рис. 5. Схема физической модели скважины (1 – жидкость; 2 – стенка стальной трубы; 3 – участок нагрева; 4 – песчаная засыпка; 5 – стенка внешней емкости, размеры указаны в мм)

Fig. 5. General view of the physical model of the well (1 – liquid; 2 – wall of a steel pipe; 3 – heating area; 4 – sand filling; 5 – external container wall, dimensions are indicated in mm)

Для нагрева металлической трубы в нее помещен модуль индуктора [20], фотография которого приведена на рис. 6. Он состоит из пяти основных блоков:

- 1) головка прибора;
- 2) управляющая электроника и питание – задающий генератор. Он необходим для преобразования постоянного напряжения в переменное с заданной частотой;
- 3) радиатор охлаждения;
- 4) активная часть (индуктор) – представляет собой медный провод, намотанный на ферритовый сердечник. Индуктор служит для создания переменного магнитного поля;

5) поршневой гидрокомпенсатор – служит для компенсации температурного расширения масла, заполняющего индуктор.

Основные технические характеристики модуля индуктора: длина активной части 500 мм при общей длине 1800 мм, внешний диаметр 42 мм, масса 8 кг, напряжение питания не более 650 В, сила питающего тока не более 8 А, диапазон рабочих давлений от 0 до 60 МПа, диапазон рабочих температур от минус 5 до 120 °С.

Анализ результатов экспериментальных исследований

Перед началом эксперимента модуль индуктора подключается через кабельную головку и эквивалент каротажного кабеля (имитирующего длину кабеля 5 км, что соответствует активному сопротивлению 62,5 Ом) к блоку питания и опускается в экспериментальную установку, заполненную водой при комнатной температуре. Мощность, подводимая к индуктору, оценивается согласно зависимости

$$P = (U_0 - I_0 R) I_0, \quad (5)$$

где U_0 – напряжение на блоке питания, I_0 – питающий ток, R – сопротивление эквивалента каротажного кабеля. Параметры проведенных экспериментов и результаты расчетов по формуле (5) представлены в таблице. При моделировании КПД индукционного нагревателя равен единице (мощность тепловыделения в обсадной колонне равна подводимой к индуктору мощности).

Таблица. Параметры экспериментов

Table. Experimental parameters

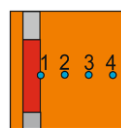
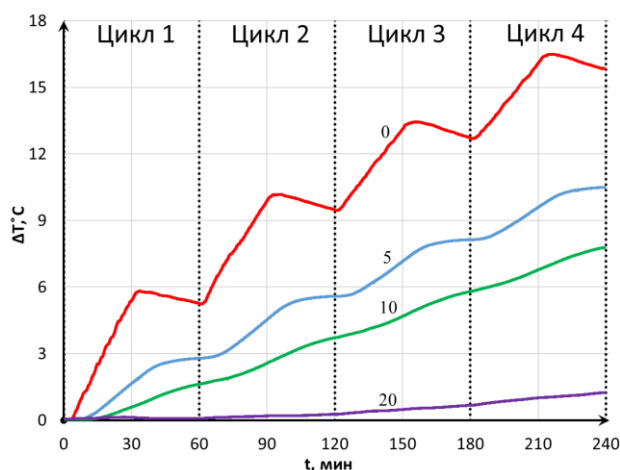
Эксперимент, № Experiment, no.	Напряжение на блоке питания, В Voltage on the power supply, V	Сила тока, А Amperage, A	Сопротивление кабеля, Ом Cable resistance, Ohms	Мощность на индукторе, кВт Power on the inductor, kW	Длительность нагрева/охлаждения, мин Heating/cooling time, min	Количество циклов Number of cycles
1	555	4,95	62,5	1,2	30/30	4
2	606	4,65	44,2	1,8	30/30	8



Рис. 6. Модуль индуктора (фотография)

Fig. 6. Inductor module (photo)

Результаты первого эксперимента представлены на рис. 7. Из рисунка следует, что за период индукционного воздействия (4 часа) температура стальной трубы на участке нагрева увеличилась более чем на $16\text{ }^{\circ}\text{C}$, на расстоянии 5 см от внешней стенки трубы (в пласте) – на величину более $10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Разогрев пласта (песчаной засыпки) на расстоянии 20 см от трубы составил около $1,2\text{ }^{\circ}\text{C}$.



(1) - температура трубы
(2) - 5 см от трубы
(3) - 10 см от трубы
(4) - 20 см от трубы

Рис. 7. Динамика температуры в физической модели скважины для эксперимента № 1 (шифр кривых – расстояние по радиусу от внешней стенки трубы до датчика температуры в см)

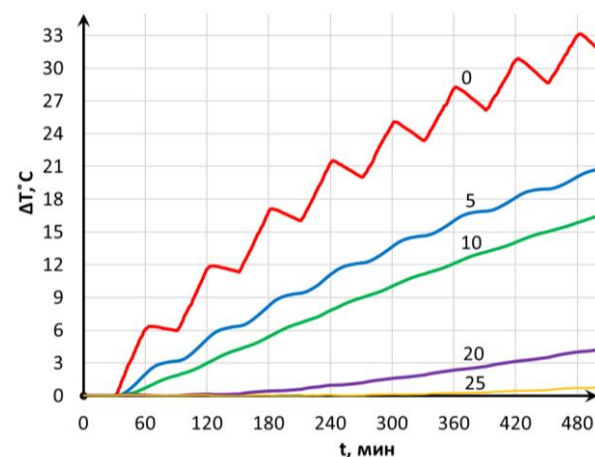
Fig. 7. Temperature dynamics in the physical model of the well for experiment no. 1 (the key of the curves is the radius distance from the outer wall of the pipe to the temperature sensor in cm)

На рис. 8 представлены результаты эксперимента № 2, который по длительности составил более 8 часов, а также характеризовался большей мощностью индукционного нагревателя по сравнению с экспериментом № 1. Температура трубы за время эксперимента увеличилась более чем на $33\text{ }^{\circ}\text{C}$, разогрев пласта на расстоянии 20 см от внешней стенки трубы составил порядка $5\text{ }^{\circ}\text{C}$, на расстоянии 25 см – порядка $1\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Сравнение результатов численного моделирования и экспериментальных данных показано на рис. 9.

Фактическая и расчетная температура трубы (колонны) в целом хорошо согласуются в фазах нагрева (после включения индуктора), однако после остановки нагревателя модель прогнозирует более интенсивное остывание трубы, чем это наблюдается в эксперименте. Из графиков на рис. 7, 8 виден асимметричный характер температурной кривой внутри

цикла индукционного воздействия «нагрев–остановка» – темп роста температуры трубы в полцикле нагрева превосходит темп снижения температуры в полцикле остановки. Такое поведение температуры связано с небольшим объемом жидкости внутри трубы в экспериментальной установке, приводящим к существенному ее разогреву при контакте с нагреваемым металлом.



— температура трубы
— 5 см от трубы
— 10 см от трубы
— 20 см от трубы
— 25 см от трубы

Рис. 8. Динамика температуры в физической модели скважины для эксперимента № 2 (шифр кривых – расстояние по радиусу от внешней стенки трубы до датчика температуры в см)

Fig. 8. Temperature dynamics in the physical model of the well for experiment no. 2 (the key of the curves is the radius distance from the outer wall of the pipe to the temperature sensor in cm)

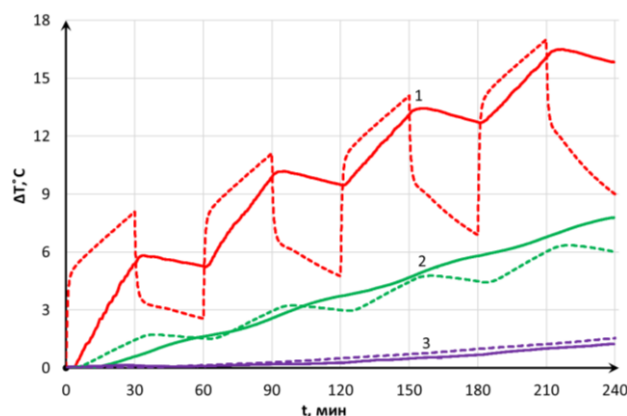


Рис. 9. Сравнение результатов эксперимента № 1 (сплошные линии) и численного моделирования (штриховые линии) на внешней стенке трубы, в 10 и 20 см от стенки (кривые 1, 2, 3 соответственно)

Fig. 9. Comparison of the results of experiment no. 1 (solid lines) and numerical modeling (dashed lines) on the outer wall of the pipe, 10 and 20 cm from the wall (curves 1, 2, 3, respectively)

Значительное влияние на температурное поле оказывает также свободная конвекция в жидкости, обуславливающая повышение интенсивности теплоотвода от стенок трубы. Внутри песчаной засыпки (в пласте) тепловое поле определяется главным образом кондуктивным механизмом теплопередачи, и расхождение между расчетной и фактической температурами снижается. В частности, на расстояниях 10 и 25 см от стенки трубы разница между моделью и экспериментом составляет около 19 % (1,5 и 0,3 °C соответственно). Это показывает применимость модели для оценки теплового поля прискважинной области пласта, обусловленного индукционным нагревом обсадной колонны в скважине.

Результаты выполненных исследований подтверждают возможность использования индукционного нагрева для очистки ближней (прискважинной) зоны пласта от АСПО. Следует также отметить, что преимуществом рассмотренного метода, в отличие от традиционных тепловых методов увеличения нефтеотдачи (закачки пара или горячей жидкости), является возможность очистки прискважинной области пласта от АСПО в необходимых, наиболее осложненных интервалах за счет управления глубиной спуска модуля индуктора. В случае же, например, закачки теплоносителя значительная его часть поступает в наиболее высокопроницаемые (т. е. менее подверженные АСПО) участки, что обуславливает снижение эффективности обработок скважины. Вместе с тем технология индукционного нагрева имеет свои особенности: наличие потерь мощности за счет выделения тепла в подводящей линии (каротажном кабеле), напряженные условия работы индуктора, определяемые прежде всего мощностью нагрева и параметрами циклического воздействия. В условиях напряженного режима работы, то есть с увеличением подводимой к индуктору мощности и длительности циклов нагрева, уменьшением паузы между циклами нагрева возрастают риски выхода из строя нагревателя. Перечисленные особенности необходимо учитывать при обоснованном выборе параметров индукционного воздействия.

Выводы

1. На основе математической модели, описывающей тепловое поле в скважине и пласте при индукционном нагреве, построены модельные кривые динамики во времени температуры на стенке обсадной колонны и в прискважинной зоне пласта. Расчеты выполнены на примере периодического индукционного воздействия с мощностью нагрева 2 кВт, циклами включения и отключения индуктора длительностью по 30 мин. Показано, что разогрев обсадной колонны за 12-часовой период индукционного воздействия достигает порядка 50 °C. Расчетный радиус распространения теплового возмущения в пласте через 12 часов составил более 0,5 м, причем разогрев пласта величиной более 5 °C достигается в прискважинной области радиусом 0,2–0,3 м в зависимости от теплопроводности горных пород.
2. С использованием физической модели скважины, оборудованной индукционным нагревателем, выполнены экспериментальные исследования формирования теплового поля в прискважинной зоне пласта. В рамках эксперимента (8 часов воздействия, мощность индуктора 1,8 кВт) температура обсадной трубы увеличилась на величину более 33 °C, разогрев пласта на расстоянии 20 см от внешней стенки трубы составил порядка 5 °C, на расстоянии 25 см – порядка 1 °C. Теоретические и экспериментальные исследования в целом показали возможность использования индукционного нагрева для очистки ближней (прискважинной) зоны пласта от АСПО.
3. Выполнено сравнение результатов численных расчетов и экспериментальных исследований. Установлено, что различие расчетной и фактической температуры в пласте не превышает 20 %, в этой связи предложенная математическая модель может быть использована для оценки области разогрева пласта, обусловленного индукционным нагревом обсадной колонны в скважине.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bai J., Jin X., Wu J.T. Multifunctional anti-wax coatings for paraffin control in oil pipelines // *Petroleum Science*. – 2019. – Vol. 16. – P. 619–631. DOI: 10.1007/s12182-019-0309-7
2. Учет особенностей образования асфальтосмолопарафиновых отложений на поздней стадии разработки нефтяных месторождений / М.Ш. Каюмов, В.П. Тронов, И.А. Гуськов, А.А. Липаев // *Нефтяное хозяйство*. – 2006. – № 3. – С. 48–49.
3. Ляпин А.Ю., Астахов А.В., Михалёв Ю.П. Исследование температуры кристаллизации парафинов в нефти с целью уменьшения образования асфальтосмолопарафиновых отложений // *Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов*. – 2017. – Т. 7. – № 6. – С. 28–35.
4. Modeling of paraffin wax deposition process in poorly extractable hydrocarbon stock / A. G. Safiulina, D.A. Ibragimova, L.R. Baibekova, R.R. Soldatova, S.M. Petrov, N.Y. Bashkirtseva // *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*. – 2018. – Vol. 53. – № 6. – P. 897–904. DOI: 10.1007/s10553-018-0879-x.
5. Илюшин П.Ю., Вяткин К.А., Козлов А.В. Исследование реологических свойств нефти в процессе образования органических отложений // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2022. – Т. 333. – № 6. – 157–166. DOI: 10.18799/24131830/2022/6/3573.

6. Research progress and discussion of waxy crude pour point depressants: a mini review / Z. Sun, J. Zhang, G. Jing, Y. Liu, S. Liu // *Recent Innovations in Chemical Engineering*. – 2020. – Vol. 13. – № 4. – P. 323–331.
7. Research on dynamic prediction model of wax deposition in wellbore / J. Deng, Z. Gao, W. He, Zh. Bai, Y. Meng, N. Lai // *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*. – 2023. – Vol. 59. – P. 182–191. DOI: 10.1007/s10553-023-01515-7.
8. Sousa A.L., Matos H.A., Guerreiro L.P. Preventing and removing wax deposition inside vertical wells: a review // *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*. – 2019. – Vol. 9. – № 3. – P. 2091–2107. DOI: 10.1007/s13202-019-0609-x.
9. Prediction of wax disappearance temperature by intelligent models / X.-Q. Bian, J.-H. Huang, Y. Wang, Y.-B. Liu, D.T. Kaushika Kasthuriarachchi, L.-J. Huang // *Energy and Fuels*. – 2019. – Vol. 33. – № 4. – P. 2934–2949. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.8b04286.
10. Akinyemi O.P., Udonne J.D., Oyedeko K.F. Study of effects of blend of plant seed oils on wax deposition tendencies of Nigerian waxy crude oil // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2018. – Vol. 161. – P. 551–558. DOI: 10.1016/j.petrol.2017.12.017.
11. Occurrence and characterization of paraffin wax formed in developing wells and pipelines / M.M. El-Dalatony, B.H. Jeon, E.S. Salama, M. Eraky, W.B. Kim, J. Wang, T. Ahn // *Energies*. – 2019. – Vol. 12. – № 6. – P. 967–989. DOI: 10.3390/en12060967.
12. Investigation on the mechanism of wax deposition inhibition induced by asphaltenes and wax inhibitors / F. Yang, H. Zhu, Ch. Li, B. Yao, F. Wang, J. Chen, G. Sun // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2021. – Vol. 204. – P. 109723. DOI: 10.1016/j.petrol.2021.108723.
13. Уразаков К.Р., Макарова Т.Г., Борисов А.О. Влияние геометрии струйного эжектора на подачу насосной установки // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2024. – Т. 335. – № 6. – С. 214–222. DOI: 10.18799/24131830/2024/6/4344
14. Липаев А.А., Трофимов Д.Е. Методы депарафинизации нефтяных скважин // *Управление техносферой*. – 2018. – Т. 1. – Вып. 4. – С. 372–386.
15. Ковалева Л.А., Зиннатуллин Р.Р., Мухарямова Г.И. Исследования влияния высокочастотного, сверхчастотного электромагнитного и теплового видов воздействия на свойства ярегской и девонской нефтей // *Вестник Тюменского государственного университета // Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика*. – 2021. – Т. 7. – № 4. – С. 10–26. DOI: 10.21684/2411-7978-2021-7-4-10-26.
16. Халилова Г.А. Технология тепловых и химических методов борьбы с асфальтосмолопарафиновыми отложениями и их эффективность // *Инновационные научные исследования*. – 2021. – № 5-2 (7). – С. 80–86. DOI: 10.5281/zenodo.5041024.
17. Гильманов А.Я., Родионова А.В., Шевелёв А.П. Расчет забойных параметров теплоносителя при его движении по стволу наклонно-направленной скважины с учетом структуры потока // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2023. – Т. 334. – № 8. – С. 121–128. DOI: 10.18799/24131830/2023/8/4032.
18. Nonisothermal fluid flow in a well during induction heating of the casing string / F.F. Davletshin, R.Z. Akchurin, R.F. Sharafutdinov, D.F. Islamov // *Fluid Dynamics*. – 2023. – Vol. 58. – № 4. – P. 586–597. DOI: 10.1134/S0015462823600505.
19. Ладин П.А., Шилов А.А., Хакимов Т.Г. Увеличение дебита нефтяных скважин с применением индукционных высокочастотных нагревателей // *Нефтяное хозяйство*. – 2001. – № 12. – С. 73–74.
20. Технология активной термометрии для решения экологических задач на месторождениях нефти и газа / А.Ш. Рамазанов, Д.В. Космылин, Р.З. Акчурин, Ф.Ф. Давлетшин, Р.А. Валиуллин, Р.Ф. Шарафутдинов, И.Г. Низаева // *Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений*. – 2024. – № 3 (387). – С. 57–62.
21. Исследование теплового поля в скважине при заколонном движении жидкости в процессе индукционного воздействия / Ф.Ф. Давлетшин, А.Ш. Рамазанов, Р.З. Акчурин, Р.Ф. Шарафутдинов, Д.Ф. Исламов // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2023. – Т. 334. – № 3. – С. 153–164. DOI: 10.18799/24131830/2023/3/3896.
22. Рамазанов А.Ш. Теоретические основы скважинной термометрии. – Уфа: Башкирский государственный университет, 2017. – 114 с.
23. Вержбицкий В.М. Основы численных методов. – М.: Высшая школа, 2002. – 840 с.
24. Temperature field in a well with casing induction heating: considering the natural convection influence / R.Z. Akchurin, F.F. Davletshin, D.F. Islamov, R.A. Valiullin, R.F. Sharafutdinov // *Thermophysics and Aeromechanics*. – 2023. – Vol. 30. – P. 487–498. DOI: 10.1134/S0869864323030083.
25. Determination of geothermal temperature and temperature gradient via measurements in the production well sump / A.Sh. Ramazanov, E.M. Chekhonin, R.Z. Akchurin, G.R. Vakhitova, R.A. Valiullin, Yu.A. Popov // *Geoenergy Science and Engineering*. – 2023. – Vol. 229. – № 4. – P. 212163. DOI: 10.1016/j.geoen.2023.212163.

Информация об авторах

Денис Владимирович Космылин, старший преподаватель кафедры геофизики Уфимского университета науки и технологий, Россия, 450074, г. Уфа, ул. Заки Валиди, 32. kosmylindenis@yandex.ru; <https://orcid.org/0009-0001-9260-0200>

Владимир Яковлевич Федотов, старший преподаватель кафедры геофизики Уфимского университета науки и технологий, Россия, 450074, г. Уфа, ул. Заки Валиди, 32; fedotovgf@yandex.ru; <https://orcid.org/0009-0005-0118-4790>

Филлус Фанизович Давлетшин, кандидат физико-математических наук, старший преподаватель кафедры геофизики Уфимского университета науки и технологий, Россия, 450074, г. Уфа, ул. Заки Валиди, 32. felix8047@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7532-1437>

Рамиль Фаизырович Шарафутдинов, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры геофизики Уфимского университета науки и технологий, Россия, 450074, г. Уфа, ул. Заки Валиди, 32. gframil@inbox.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6980-8364>

Рим Абдуллович Валиуллин, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой геофизики Уфимского университета науки и технологий, Россия, 450074, г. Уфа, ул. Заки Валиди, 32. val-rageo@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3705-8260>

Поступила в редакцию: 01.08.2024

Поступила после рецензирования: 19.09.2024

Принята к публикации: 21.04.2025

REFERENCES

1. Bai J., Jin X., Wu J.T. Multifunctional anti-wax coatings for paraffin control in oil pipelines. *Petroleum Science*, 2019, vol. 16, pp. 619–631. DOI: 10.1007/s12182-019-0309-7.
2. Kayumov M.Sh., Tronov V.P., Guskov I.A., Lipaev A.A. The account of asphalt-tar-paraffin deposits formation features at a late stage of development of petroleum deposits. *Oil industry*, 2006, no. 3, pp. 48–49. (In Russ.)
3. Lyapin A.Y., Astakhov A.V., Mikhalyov Yu.P. Study of the wax crystallization temperature in oil in order to reduce the formation of asphalt-resin-paraffin deposits. *Science and technology of pipeline transportation of oil and petroleum products*, 2017, vol. 7, no. 6, pp. 28–35. (In Russ.)
4. Safiulina A.G., Ibragimova D.A., Baibekova L.R., Soldatova R.R., Petrov S.M., Bashkirtseva N.Y. Modeling of paraffin wax deposition process in poorly extractable hydrocarbon stock. *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*, 2018, vol. 53, no. 6, pp. 897–904. DOI: 10.1007/s10553-018-0879-x.
5. Ilyushin P.Yu., Vyatkin K.A., Kozlov A.V. Investigation of rheological properties of oil during the formation of wax deposits. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, no. 6, pp. 157–166. (In Russ) DOI: 10.18799/24131830/2022/6/3573.
6. Sun Z., Zhang J., Jing G., Liu Y., Liu S. Research progress and discussion of waxy crude pour point depressants: a mini review. *Recent Innovations in Chemical Engineering*, 2020, vol. 13, no. 4, pp. 323–331.
7. Deng, J., Gao, Z., He, W., Bai Zh., Meng Y., Lai N. Research on dynamic prediction model of wax deposition in wellbore. *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*, 2023, vol. 59, pp. 182–191. DOI: 10.1007/s10553-023-01515-7.
8. Sousa A.L., Matos H.A., Guerreiro L.P. Preventing and removing wax deposition inside vertical wells: a review. *Journal of petroleum exploration and production technology*, 2019, vol. 9, no. 3, pp. 2091–2107. DOI: 10.1007/s13202-019-0609-x.
9. Bian X.-Q., Huang J.-H., Wang Y., Liu Y.-B., Kaushika Kasthuriarachchi D.T., Huang L.-J. Prediction of wax disappearance temperature by intelligent models. *Energy and Fuels*, 2019, vol. 33, no. 4, pp. 2934–2949. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.8b04286.
10. Akinyemi O.P., Udonne J.D., Oyedeko K.F. Study of effects of blend of plant seed oils on wax deposition tendencies of Nigerian waxy crude oil. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2018, vol. 161, pp. 551–558. DOI: 10.1016/j.petrol.2017.12.017.
11. El-Dalatony M.M., Jeon B.H., Salama E.S., Eraky M., Kim W.B., Wang J., Ahn T. Occurrence and characterization of paraffin wax formed in developing wells and pipelines. *Energies*, 2019, vol. 12, no. 6, pp. 967–989. DOI: 10.3390/en12060967.
12. Yang F., Zhu H., Li Ch., Yao B., Wang F., Chen J., Sun G. Investigation on the mechanism of wax deposition inhibition induced by asphaltenes and wax inhibitors. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2021, vol. 204, pp. 109723. DOI: 10.1016/j.petrol.2021.108723.
13. Urazakov K.R., Makarova T.G., Borisov A.O. Effect of jet ejector geometry on the supply of a pumping unit preventing wax-deposit. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 6, pp. 214–222. (In Russ.) DOI: 10.18799/24131830/2024/6/4344.
14. Lipaev A.A., Trofimov D.E. Methods of deparaffination of oil wells. *Management of the technosphere*, 2018, vol. 1, no. 4, pp. 372–386. (In Russ.)
15. Kovaleva L.A., Zinnatullin R.R., Mukharyamova G.I. Research on the influence of high-frequency, super-high-frequency electromagnetic and thermal effects on the properties of yaregskaya and devonian petroleum. *Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy*, vol. 7, no. 4 (28), pp. 10–26. (In Russ.) DOI: 10.21684/2411-7978-2021-7-4-10-26.
16. Khalilova G.A. Technology of thermal and chemical methods of combating asphalt-resol-paraffin deposits and their efficiency. *Innovative scientific research*, 2021, no. 5-2 (7), pp. 80–86. (In Russ.) DOI: 10.5281/zenodo.5041024.
17. Gilmanov A.Ya., Rodionova A.V., Shevelev A.P. Calculation of the bottom-hole parameters of the heat carrier during its movement along the wellbore of a directional well considering the flow structure. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2023, vol. 334, no. 8, pp. 121–128. (In Russ.) DOI: 10.18799/24131830/2023/8/4032
18. Davletshin F.F., Akchurin R.Z., Sharafutdinov R.F., Islamov D.F. Nonisothermal fluid flow in a well during induction heating of the casing string. *Fluid Dynamics*, 2023, vol. 58, no. 4, pp. 586–597. DOI: 10.1134/S0015462823600505.
19. Ladin P.A., Shilov A.A., Khakimov T.G. Increasing the flow rate of oil wells using induction high-frequency heaters. *Oil industry*, 2001, no. 12, pp. 73–74. (In Russ.)
20. Ramazanov A.Sh., Kosmylin D.V., Akchurin R.Z., Davletshin F.F., Valiullin R.A., Sharafutdinov R.F., Nizaeva I.G. Active thermometry technology for solving environmental problems in oil and gas fields. *Geology, geophysics and development of oil and gas fields*, 2024, no. 3 (387), pp. 57–62. (In Russ.)
21. Davletshin F.F., Ramazanov A.Sh., Akchurin R.Z., Sharafutdinov R.F., Islamov D.F. Investigation of thermal field in a well under fluid movement under induction impact. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2023, vol. 334, no. 3, pp. 153–164. (In Russ.) DOI: 10.18799/24131830/2023/3/3896.

22. Ramazanov A.Sh. *Theoretical foundations of borehole thermometry*. Ufa, Bashkir State University, 2017. 114 p. (In Russ.)
23. Verzhbitsky V.M. *Fundamentals of numerical methods*. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2002. 840 p. (In Russ.)
24. Akchurin R.Z., Davletshin F.F., Islamov D.F., Valiullin R.A., Sharafutdinov R.F. Temperature field in a well with casing induction heating: considering the natural convection influence. *Thermophysics and Aeromechanics*, 2023, vol. 30, pp. 487–498. DOI: 10.1134/S0869864323030083.
25. Ramazanov A.Sh., Chekhonin E.M., Akchurin R.Z., Vakhitova G.R., Valiullin R.A., Popov Yu.A. Determination of geothermal temperature and temperature gradient via measurements in the production well sump. *Geoenergy Science and Engineering*, 2023, vol. 229, no. 4, pp. 212163. DOI: 10.1016/j.geoen.2023.212163.

Information about the authors

Denis V. Kosmylin, Senior Lecturer, Ufa University of Science and Technology, 32, Zaki Validi street, Ufa, 450076, Russian Federation. kosmylindenis@yandex.ru; <https://orcid.org/0009-0001-9260-0200>

Vladimir Ya. Fedotov, Senior Lecturer, Ufa University of Science and Technology, 32, Zaki Validi street, Ufa, 450076, Russian Federation. fedotovgf@yandex.ru; <https://orcid.org/0009-0005-0118-4790>

Filyus F. Davletshin, Cand. Sc., Senior Lecturer, Ufa University of Science and Technology, 32, Zaki Validi street, Ufa, 450076, Russian Federation. felix8047@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7532-1437>

Rim A. Valiullin, Dr. Sc., Professor, Head of the Department, Ufa University of Science and Technology, 32, Zaki Validi street, Ufa, 450076, Russian Federation. valrageo@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3705-8260>

Ramil F. Sharafutdinov, Dr. Sc., Professor, Ufa University of Science and Technology, 32, Zaki Validi street, Ufa, 450076, Russian Federation. gframil@inbox.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6980-8364>

Received: 01.08.2024

Revised: 19.09.2024

Accepted: 21.04.2025

УДК 550.8.023; 519.223.4
DOI: 10.18799/24131830/2025/7/4755
Шифр специальности ВАК: 1.6.11
Научная статья

Типизация карбонатных пород-коллекторов с применением метода накопленной корреляции и индивидуальных вероятностных моделей на примере месторождений Южно-Хорейверской площади

И.С. Путилов^{1,2}, Т.А. Жемчугова^{1,2}✉

¹ ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг», Россия, г. Пермь

² Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Россия, г. Пермь

✉ Zhemchugova.tan@mail.ru

Аннотация. *Актуальность* обусловлена необходимостью понимания сложного карбонатного объекта для уверенного прогноза свойств пород-коллекторов, описания математическими инструментами закономерностей изменения структуры пустотного пространства и совершенствования методов типизации пород-коллекторов при интерпретации петрофизических данных, полученных в лабораторных условиях. *Цель.* Комплексное применение индивидуальных вероятностных моделей и метода накопленной корреляции для описания закономерностей изменения структуры пустотного пространства и типизации карбонатных пород-коллекторов с учетом результатов фациального и литологического анализа на примере объекта задонских карбонатных рифовых отложений фаменского яруса верхнего девона Южно-Хорейверского участка. *Методы.* Математическое моделирование, методы математической статистики для анализа экспериментальных данных и для описания закономерностей. *Результаты и выводы.* Выполнена оценка статистической различимости образцов керна на основе t-критерия Стьюдента и F-критерия Фишера, сгруппированных по типу пустотного пространства, литологии и фациальной принадлежности. При помощи индивидуальных вероятностных моделей от коэффициента открытой пористости с учетом геологических факторов и графиков накопленной корреляции изучены закономерности изменения структуры пустотного пространства. Дополнительно оценена нелинейность трендов индивидуальных вероятностных моделей, позволившая выделить подзоны на графике накопленной корреляции, а также описать углы наклонов и другие эффекты. По результатам линейно-дискриминантного анализа получены статистически значимые функции для типизации образцов по типу пустотного пространства. По результатам множественного регрессионного анализа по открытой пористости для карбонатных пород-коллекторов получены статистически значимые множественные регрессионные модели раздельного и совместного влияния разных геологических факторов на пористость. На основе проведенных исследований и комплексного анализа установлено и подтверждено, что комплексное использование накопленной корреляции и индивидуальных вероятностных моделей является информативным аналитическим и математическим инструментом для типизации карбонатных пород-коллекторов и оценки связей и взаимовлияния геологических факторов в породе.

Ключевые слова: тип пустотного пространства, фации, фильтрационно-емкостные свойства, индивидуальные вероятностные модели, метод накопленной корреляции, пошаговая множественная регрессия

Для цитирования: Путилов И.С., Жемчугова Т.А. Типизация карбонатных пород-коллекторов с применением метода накопленной корреляции и индивидуальных вероятностных моделей на примере месторождений Южно-Хорейверской площади // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 7. – С. 56–68. DOI: 10.18799/24131830/2025/7/4755

UDC 550.8.023; 519.223.4
DOI: 10.18799/24131830/2025/7/4755
Scientific paper

Typing carbonate reservoir rocks using the accumulated correlation method and individual probabilistic models on the example of fields in the Yuzhno-Khoreyverskaya area

I.S. Putilov^{1,2}, T.A. Zhemchugova^{1,2}✉

¹ OOO LUKOIL-Engineering, Perm, Russian Federation

² Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

✉ Zhemchugova.tan@mail.ru

Abstract. Relevance. The need to understand a complex carbonate object for a confident prediction of the properties of reservoir rocks, to describe with mathematical tools the patterns of changes in the structure of void space and to improve methods for typing reservoir rocks when interpreting petrophysical data obtained in laboratory conditions. **Aim.** Integrated application of individual probabilistic models and the accumulated correlation method to describe patterns of changes in the structure of void space and typification of carbonate reservoir rocks, taking into account the results of facies and lithological analysis using the example of the Trans-Don carbonate reef deposits of the Famennian stage of the Upper Devonian of the South Khoreyversky area. **Methods.** Mathematical modeling, methods of mathematical statistics for the analysis of experimental data and for describing patterns. **Results and conclusions.** The authors have assessed the statistical distinguishability of core samples based on the Student's t-test and Fisher's F-test, grouped by type of void space, lithology and facies. They studied the patterns of changes in the structure of the void space using individual probabilistic models of the open porosity coefficient, taking into account geological factors and accumulated correlation graphs. Additionally, the authors assessed the nonlinearity of trends in individual probabilistic models, which made it possible to identify subzones on the accumulated correlation graph, as well as describe slope angles and other effects. Based on the results of linear discriminant analysis, statistically significant functions were obtained for typing samples according to the type of void space. Based on the results of multiple regression analysis of open porosity for carbonate reservoir rocks, statistically significant multiple regression models of the separate and combined influence of different geological factors on porosity were obtained. Based on the conducted research and comprehensive analysis, it was established and confirmed that the integrated use of accumulated correlation and individual probabilistic models is an informative analytical and mathematical tool for typing carbonate reservoir rocks and assessing the connections and mutual influence of geological factors in the rock.

Keywords: type of void space, facies, reservoir properties, individual probabilistic models, cumulative correlation method, stepwise multiple regression

For citation: Putilov I.S., Zhemchugova T.A. Typing carbonate reservoir rocks using the accumulated correlation method and individual probabilistic models on the example of fields in the Yuzhno-Khoreyverskaya area. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 7, pp. 56–68. DOI: 10.18799/24131830/2025/7/4755

Введение

Продуктивные отложения месторождений Южно-Хорейверского участка представлены сложно-построенными карбонатными коллекторами со сложной структурой пустотного пространства, изучение которых является до сих пор актуальной и остро стоящей задачей. Сложнопостроенные карбонаты определяют проблемы в уверенном прогнозе ухудшенных и улучшенных свойств пород-коллекторов, в понимании закономерностей распределения типов пустотного пространства, лито-фациальных зон и истории формирования залежей [1–5]. Понимание обстановки осадконакопления и закономерностей изменения структуры пустотного

пространства, а также учет фациальной дифференциации позволят в полной мере отразить достоверное геологическое строение [6–15], а значит более уверенно планировать разведку, доразведку месторождений и структур, а также разработку и эксплуатацию продуктивных отложений.

Целью данной работы является комплексное применение индивидуальных вероятностных моделей и метода накопленной корреляции для детального описания закономерностей изменения структуры порового пространства и типизации карбонатных пород с привлечением литологического и фациального анализа на примере объекта D₃fm₁zd месторождений Южно-Хорейверского участка.

Материалы и методы

Южно-Хорейверская площадь в административном отношении расположена в Усинском районе республики Коми, в 35 км севернее г. Усинска. В тектоническом плане площадь расположена в области сочленения Сандивейского поднятия, Сынянйрдской депрессии и Макариха-Салюкинской антиклинальной зоны Хорейверской впадины. Район работ включает четыре месторождения: *Восточно-Мастерьевское*, *Среднемичаельское*, *Центральномичаельское* и *Мичаельское*, а также перспективные структуры. Задонские отложения D_3fm_1zd сложены преимущественно микробияльно-детритовыми и граноморфными известняками, вторичными доломитами и незначительным количеством песчаников. Продуктивные отложения вскрыли 37 скважин на текущий момент. При проведении исследований использовались 1622 образца керн диаметром и длиной 30 и 100 мм и 425 шлифов, приуроченных к продуктивным задонским отложениям.

Задонские отложения сформировались во франско-фаменское время Южно-Баганской карбонатной банки, имеющей сложное атолловое строение, согласно концептуальной модели которой подразумевается наличие отдельных периферийных островов, внутриостровных лагун и межрифовых проливов [16–18]. На атолловое строение продуктивных отложений указывают структурно-текстурные особенности пород, результаты литолого-фациального анализа керн, структурной интерпретации данных сейсморазведки 3D и инверсионных исследований, различие флюидалных контактов, результаты анализа гидродинамических исследований (трассерных исследований) и текущее состояние разработки залежей (по накопленным отборам и энергетическому состоянию залежей). Породы были сгруппированы в пять фациальных комплексов, таких как: органогенная постройка, рифовый шлейф, зарифовое мелководье, врезовой канал, склон органогенной постройки, с характерными для них литотипами, и две группы литотипов, не привязанных к фациями ввиду вторичных преобразований, но отнесенных к фациальным комплексам в рамках исследования, включающие вторичные доломиты и глинисто-карбонатную породу. Фация органогенной постройки сложена известняками микробияльными, микробияльно-детритовыми и сферово-узорчатыми. Фация рифового шлейфа – известняками граноморфными пеллоидными, интракластово-пеллоидными. Фация зарифового мелководья – известняками микробияльными ооидными (оолитовыми) и интракластово-ооидными. Фация врезового канала сложена кварцевыми песчаниками мелкозернистыми и алевропесчаниками с карбонатным цементом, склон по-

стройки – вторичными доломитами и брекчией крупнощебневой литокластической. Фация вторичных доломитов представлена вторичными кристаллическими, средне- и крупнозернистыми доломитами. Фация глинисто-карбонатной породы сложена ангидритом.

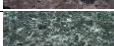
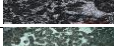
Для оценки связи и закономерностей изменения структуры пустотного пространства сложнопостроенных карбонатных отложений выборка образцов керн была разделена на несколько групп по разным признакам и свойствам пород: по типу коллектора (типу пустотного пространства), по литологическим свойствам, по фациальному комплексу (табл. 1) [19–22].

По результатам лабораторных исследований основных фильтрационно-емкостных свойств (ФЕС) образцы керн по типу коллектора разделены на трещинный (T1) в количестве 396, трещинно-каверново-поровый (T2) в количестве 288 и поровый и каверново-поровый (T3) в количестве 995 по коэффициенту открытой пористости. Количество образцов с данными по открытой пористости и газопроницаемости различается, что и отображено в табл. 1. Отметим, что при оценке типизации пустотного пространства, выполненного лабораторным путем, были привлечены результаты метода капилляриметрии (соотношение пор различных размеров, средний радиус пор) [23, 24]. По результатам анализа отмечается увеличение содержания крупных пор в северо-восточном направлении Южно-Хорейверского участка, а также влияние среднего радиуса пор на газопроницаемость с учетом типов коллекторов (пустотного пространства), что подтверждает деление выборки на разные группы по данному признаку. По литологическим свойствам образцы керн разделены на три группы: известняк (Lito1) в количестве 1476; группа, включающая брекчию, ангидрит и доломит (Lito2), в количестве 123; песчаник (Lito3) в количестве 20. По результатам фациальной диагностики литотипов пород было выделено пять фациальных комплексов: органогенная постройка (F1) в количестве 1186, рифовый шлейф (F2) – 259, зарифовое мелководье (F3) – 47, врезовой канал (F4) – 20 и склон постройки (F5) – 25 и две группы литотипов, не привязанные к фациальным комплексам ввиду вторичных преобразований: вторичные доломиты (F6) в количестве 97 и глинисто-карбонатная порода (F7) – 7 образцов. Органогенная постройка преобладает в разрезах скважин, что отчетливо видно и по соотношению образцов в выборке.

Отмечаются различия в средних значениях по $K_{прг}$ – коэффициенту проницаемости по газу, и $K_{п}$ – коэффициенту открытой пористости по выборкам различных групп образцов по типу коллектора, литологии и фациальному комплексу.

Таблица 1. Результаты лабораторных исследований основных фильтрационно-емкостных свойств и литолого-петрографического анализа

Table 1. Results of laboratory studies of the main reservoir properties and lithological and petrographic analysis

Параметры Options		Фото шлифа Thin section photo	Количество образцов, шт. Number of samples, pcs.	Пористость, % Porosity, %	Количество образцов, шт. Number of samples, pcs.	Проницаемость, 10 ⁻³ мкм ² Permeability, 10 ⁻³ мкм ²
Тип коллектора Collector type	Трещинный (T1) Fractured		396	<u>0,73±0,4</u> 0,1–1,95	369	<u>0,71±20,49</u> 0,01–187,2
	Трещинно-каверново-поровый (T2) Fractured-cavernous-porous		288	<u>4,64±2,93</u> 0,51–16,93	164	<u>16,58±192,44</u> 0,95–1728,31
	Поровый и каверново-поровый (T3) Porous and cavernous-porous		995	<u>3,78±3,42</u> 0,26–17,44	798	<u>0,35±46,21</u> 0,01–603,8
Литология Lithology	Известняк (Lito1) Limestone		1476	<u>3,21±3,32</u> 0,1–17,44	1172	<u>0,7±77,13</u> 0,01–1728,31
	Брекчия+Ангидрит+Доломит (Lito2) Breccia+Anhydrite+Dolomite		123	<u>2,89±2,63</u> 0,18–14,91	96	<u>0,57±126,34</u> 0,01–869,4
	Песчаник (Lito3) Sandstone		20	<u>4,72±1,93</u> 0,88–8,91	20	<u>0,56±4,75</u> 0,12–19,88
Фациальный комплекс Facies complex	Органогенная постройка (F1) Organogenic building		1186	<u>3,09±3,17</u> 0,1–17,44	929	<u>0,76±64,53</u> 0,01–1149,05
	Рифовый шлейф (F2) Reef plume		259	<u>4,17±3,89</u> 0,24–16,57	212	<u>0,56±120,41</u> 0,01–1728,31
	Зарифовое мелководье (F3) Back-reef shallow water		47	<u>1,33±1,54</u> 0,2–7,07	43	<u>0,27±32,56</u> 0,01–179,5
	Врезовой канал (F4) Mortise channel		20	<u>4,72±1,93</u> 0,88–8,91	20	<u>0,56±4,75</u> 0,12–19,88
	Склон постройки (F5) Slope of the building		25	<u>2,09±0,73</u> 1,3–4,74	20	<u>0,49±0,57</u> 0,11–2,03
	Вторичные доломиты (вне фаций) (F6) Secondary dolomites (outside facies)		97	<u>3,07±2,93</u> 0,18–14,91	62	<u>0,84±159,29</u> 0,01–869,4
	Глинисто-карбонатная порода (вне фаций) (F7) Clay-carbonate rock (outside facies)		5	<u>1,46±0,93</u> 0,39–2,87	2	<u>0,2±0,67</u> 0,04–0,99

Примечание: в числителе указано среднее арифметическое значение (для коэффициента проницаемости – среднее геометрическое) ± стандартное отклонение, в знаменателе – минимальное и максимальные значения параметра.

Note: the numerator indicates the arithmetic mean (for the permeability coefficient – the geometric mean) ± standard deviation, the denominator indicates the minimum and maximum values of the parameter.

Наибольшая средняя пористость отмечается у трещинно-каверново-порового, порового и каверново-порового типов. Наибольшая средняя проницаемость характерна для трещинно-каверново-порового типа. У песчаников и известняков отмечается наибольшая средняя пористость, тогда как наибольшая средняя проницаемость – для брекчий, ангидритов и доломитов, затем для известняков. Наибольшая средняя пористость характерна для фаций органогенной постройки, рифового шлейфа и врезового канала. Наибольшая средняя геометрическая проницаемость характерна для фаций органогенной постройки, рифового шлейфа и зарифового мелководья.

Для подтверждения неоднородности было выполнено сравнение средних значений групп выборок на основе t-критерия Стьюдента с учетом поправки Бонферрони и многофакторный дисперсионный анализ для параметров соседних фаций, литологических групп и типов коллекторов.

На основе t-критерия Стьюдента с учетом поправки Бонферрони было установлено между все-

ми типами коллекторов статистически значимое различие по коэффициенту открытой пористости. Для литологических групп значимое различие по пористости отмечается между песчаниками (Lito3) и брекчией, ангидритами и доломитами (Lito2). Известняки (Lito1) статистически не отличимы от других литологических групп в силу существенной выборки из общего объема. Все фациальные группы также статистически различимы по пористости, кроме фации органогенной постройки (F1) с кварцевыми песчаниками (F4), склоном постройки (F5), вторичными доломитами (F6) и глинисто-карбонатной породой (F7). Фация рифового шлейфа (F2) статистически различима только с фацией зарифового мелководья (F3). Глинисто-карбонатная порода (F7) не различима со всеми фациальными группами, кроме врезового канала (F4). Врезовой канал (F4) различим с зарифовым мелководьем (F3) и склоном постройки (F5). По коэффициенту газопроницаемости наблюдается различие между всеми типами коллекторов, статистически не различимы только трещинный (T1) и

каверно-поровый (ТЗ) типы. Литологические и фациальные группы статистически не различимы по $K_{прг}$, что связано со сложной структурой пустотного пространства и в целом со строением карбонатных коллекторов Тимано-Печорского региона. Соответственно, для фактора «тип коллектора» отмечается наибольшее различие по коэффициентам газопроницаемости и открытой пористости.

По результатам многофакторного (трехфакторного) дисперсионного анализа отмечено отсутствие значимого взаимосвязанного влияния трех факторов (фациального, литологического и типизации пустотного пространства) на параметры ФЕС. Для понимания различий в факторах был выполнен двухфакторный анализ и метод контрастов, согласно которым отмечается внутригрупповая дисперсия по F-критерию Фишера (статистическое различие $p < 0,05$) между элементами факторов: фаций, литологических групп и типов коллекторов, и их влияние на пористость, также для фациальных групп – на газопроницаемость. При комбинации факторов – типа пустотного пространства (типа коллектора) и фаций – отмечается межгрупповая дисперсия и влияние на два параметра: коэффициент открытой пористости и газопроницаемости. Комбинации факторов фаций и литологических групп, типов коллекторов и литологических групп, согласно проведенному анализу, не являются значимыми, что означает одинаковое проявление влияния на пористость и газопроницаемость.

Сравнением результатов статистического внутригруппового различия и влияния на параметры ФЕС с использованием F-критерия Фишера и t-критерия Стьюдента установлено, что типы коллекторов, литологические и фациальные группы статистически различаются по коэффициенту открытой пористости по обоим критериям. По коэффициенту газопроницаемости литологические группы статистически не различимы по обоим критериям. Типы коллекторов по коэффициенту газопроницаемости преимущественно статистически различимы по t-критерию Стьюдента, фациальные группы различимы по F-критерию Фишера.

Далее для оценки вероятности появления различных групп образцов керна были построены индивидуальные вероятностные модели (ИВМ) в зависимости от изменения коэффициента открытой пористости для пустотного пространства, литологии и фациального комплекса [19]. ИВМ является восстанавливающим графиком, который даже при отсутствии разделения на структуры пустотного пространства в корреляционном поле петрофизической модели позволяет получить понимание связей и закономерностей изменения свойств: вероятности появления типов коллекторов, влияния литологии и

фациальной принадлежности на структуру пустотного пространства, а также изменения основных ФЕС. Весь набор полиномиальных уравнений ИВМ ($P(x)$) представлен в табл. 2.

ИВМ можно интерпретировать по направлению тренда, размерности выборки в группах, углу наклона ИВМ, отражающего диапазон параметра K_n влияния группы выборки образцов керна, и комплексному анализу геологических закономерностей появления типов пустотного пространства, литотипов и фациальных комплексов при изменении ФЕС. Для интерпретации ИВМ учитывалась вероятность $P=0,5$ при оценке влияния на пористость различных геологических факторов.

По результатам оценки построенных индивидуальных вероятностных моделей с учетом корректности отмечается, что при изменении K_n (рис. 1):

- уменьшается вероятность встречи трещинного типа коллектора (Т1) при $K_n=2,5$ %;
- увеличивается вероятность встречи песчаника (Lito3) и отражающего его фациального комплекса – врезового канала (F4) при $K_n=4$ %, а также фации рифового шлейфа при $K_n=3,5$ %;
- уменьшается вероятность встречи зарифового мелководья (F3), склона постройки (F5) и глинисто-карбонатной породы (F7) при $K_n=2,5$ %.
- по пересечению трендов отмечается смена влияния фаций рифового шлейфа на врезовой канал при $K_n=5$ %.

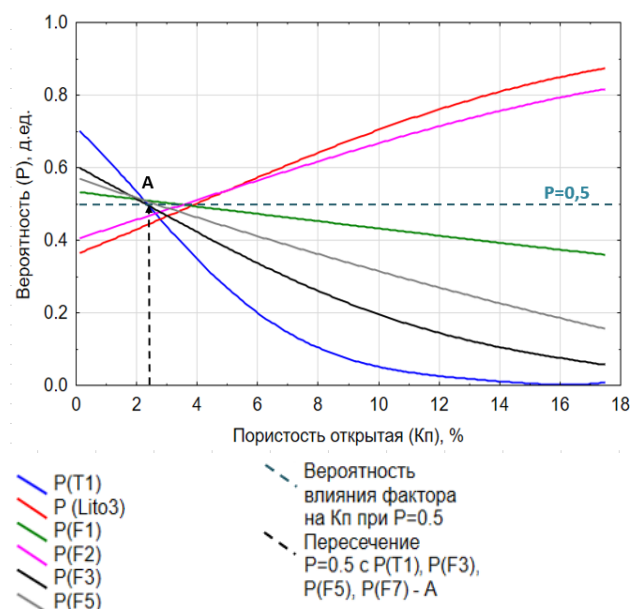


Рис. 1. Индивидуальные вероятностные модели для объекта $Dzfm1$ месторождений Южно-Хорейверского участка

Fig. 1. Individual probabilistic models for object $Dzfm1$ of the Yuzhno-Khoreyversky area field

Таблица 2. Набор полиномиальных уравнений индивидуальных вероятностных моделей от изменения коэффициента открытой пористости и газопроницаемости

Table 2. Set of polynomial equations of individual probability models from changes in the coefficient of open porosity and gas permeability

Параметры Options		Индивидуальные вероятностные модели от изменения открытой пористости (1 строка); диапазон изменения открытой пористости (2 строка), %; диапазон изменения вероятностей (3 строка) Individual probability models from changes in open porosity (1 line); range of changes in open porosity (2 line), %; range of probability changes (3 line)	p*	Fp/Ft**
Тип коллектора Collector type	Трещинный (Т1) Fractured	$P(T1)=0,7078-0,0719 \cdot K_n-0,012 \cdot K_n^2+0,0024 \cdot K_n^3-0,0001 \cdot K_n^4+2,8866E-6 \cdot K_n^5$	<10 ⁻⁶	373,33
		0,1–1,95		
		0–0,7		
	Трещинно-каверново-поровый (Т2) Fractured-cavernous-porous	$P(T2)=0,3435+0,038 \cdot K_n+0,0015 \cdot K_n^2-0,0002 \cdot K_n^3+3,2707E-6 \cdot K_n^4$	<10 ⁻⁶	70,65
		0,51–16,93		
		0,35–0,91		
	Поровый и каверново-поровый (Т3) Porous and cavernous-porous	$P(T3)=0,3929+0,0335 \cdot K_n+0,0007 \cdot K_n^2-8,4905E-5 \cdot K_n^3+1,6272E-6 \cdot K_n^4$	<10 ⁻⁶	80,82
		0,26–17,44		
		0,4–0,88		
Литология Lithology	Известняк (Lito1) Limestone	$P(Lito1)=0,4948+0,0016 \cdot K_n$	0,81	0,06
		0,1–17,44		
		0,49–0,52		
	Брекчия+Ангидрит+Доломит (Lito2) Breccia+Anhydrite+Dolomite	$P(Lito2)=0,5248-0,0081 \cdot K_n+7,6154E-6 \cdot K_n^2$	0,26	1,27
		0,18–14,91		
		0,39–0,52		
	Песчаник (Lito3) Sandstone	$P(Lito3)=0,3619+0,0328 \cdot K_n+0,0009 \cdot K_n^2-8,8432E-5 \cdot K_n^3+1,529E-6 \cdot K_n^4$	0,038	4,33
		0,88–8,91		
		0,37–0,87		
Фациальный комплекс Facies complex	Органогенная постройка (F1) Organogenic building	$P(F1)=0,5335-0,0101 \cdot K_n-1,3002E-5 \cdot K_n^2+1,3328E-6 \cdot K_n^3$	0,019	5,54
		0,1–17,44 %		
		0,36–0,53		
	Рифовый шлейф (F2) Reef plume	$P(F2)=0,4033+0,0264 \cdot K_n+0,0002 \cdot K_n^2-2,1024E-5 \cdot K_n^3$	<10 ⁻⁶	26,96
		0,24–16,57		
		0,41–0,82		
	Зарифовое мелководье (F3) Back-reef shallow water	$P(F3)=0,6035-0,0435 \cdot K_n-0,0011 \cdot K_n^2+0,0002 \cdot K_n^3-4,5117E-6 \cdot K_n^4$	0,00006	16,12
		0,2–7,07		
		0,06–0,6		
	Врезовой канал (F4) Mortise channel	$P(F4)=0,3619+0,0328 \cdot K_n+0,0009 \cdot K_n^2-8,8432E-5 \cdot K_n^3+1,529E-6 \cdot K_n^4$	0,038	4,33
		0,88–8,91		
		0,37–0,87		
	Склон постройки (F5) Slope of the building	$P(F5)=0,5705-0,0261 \cdot K_n-0,0002 \cdot K_n^2+3,383E-5 \cdot K_n^3-5,2169E-7 \cdot K_n^4$	0,084	2,99
		1,3–4,74		
		0,17–0,57		
	Вторичные доломиты (вне фаций) (F6) Secondary dolomites (outside facies)	$P(F6)=0,5167-0,0054 \cdot K_n$	0,55	0,36
		0,18–14,91		
		0,42–0,52		
	Глинисто-карбонатная порода (вне фаций) (F7) Clay-carbonate rock (outside facies)	$P(F7)=0,5949-0,0393 \cdot K_n-0,0008 \cdot K_n^2+0,0001 \cdot K_n^3-3,0824E-6 \cdot K_n^4$	0,23	1,44
		0,39–2,87		
		0,08–0,59		

Примечание: * – уровень статистической значимости; ** – соотношение эмпирического и теоретического критериев Фишера.

Note: * – level of statistical significance; ** – ratio of empirical and theoretical Fisher criteria.

Можно предположить, что до 2,5 % на K_n влияет трещинный тип коллектора, начиная с 3–3,5 % влияют начинают трещинно-каверново-поровый, поровый и каверново-поровый типы коллекторов, при этом наибольшее влияние у трещинно-каверново-порового типа. По литологическим свойствам до 3 % оказывает влияние на K_n брекчия, ангидрит, доломит, более 4 % – песчаник, известняк оказывает влияние во всем диапазоне K_n (наибольшее количество образцов). По фациальной принадлежности до 2,5–3,5 % на K_n оказывают влияние органогенная постройка, зарифовое мелководье, склон построй-

ки, вторичные доломиты и глинисто-карбонатная порода, при K_n более 3,5–4 % влияют врезовой канал и рифовый шлейф, при этом наибольшее влияние у врезового канала при K_n более 5 %. Органо-генная постройка и вторичные доломиты развиты повсеместно, соответственно, в целом влияют на K_n .

При анализе угла наклона ИВМ и вероятности появления видно, что чем меньше угол наклона, тем меньшее различие и влияние на K_n отмечается. Так, до $K_n=2,5$ % (граница А) оказывают влияние трещинный тип коллектора, фация зарифового

мелководья, склона постройки и глинисто-карбонатная порода, при K_p более 3,5–4 % на пористость оказывают влияние трещинно-каверново-поровый, поровый и каверно-поровый тип коллектора, литотип песчаник, фациальные комплексы – рифовый шлейф и врезовой канал. При K_p более 7 % отмечается усложнение структуры пустотного пространства фациальных групп с преобладанием поровых и каверно-поровых образцов. Для литотипа брекчии, доломита и ангидрита, фациальных комплексов органогенной постройки и вторичных доломитов оценить вероятность появления и исчезновения данных групп образцов и их влияния на изменение структуры пустотного пространства не представляется возможным в связи с инвариантностью ИВМ (в одном диапазоне близком $P=0,5$) во всем диапазоне изменения K_p , что связано с повсеместным распространением в породе. Соответственно, во всем диапазоне изменения открытой пористости до 2,5 % преимущественно влияет тип коллектора, с 2,5 до 4 % – тип коллектора, литология и фациальные комплексы, с 4 % – тип коллектора и фациальные комплексы, что наглядно отображено на рис. 1 и характеризует определенную смену влияния геологических факторов на ФЕС. Характерные точки пересечения ИВМ с вероятностью $P=0,5$ отражают зоны разных структур порового пространства. По результатам анализа выделена граница А (рис. 1), где отмечается наибольшая концентрация снижения влияния геологических факторов на коэффициент открытой пористости.

Для понимания природы изменения и усложнения структуры порового пространства был выполнен дополнительный анализ ИВМ – по набору кривизны при увеличении пористости. Принцип анализа нелинейности ИВМ заключается в учете того, что общая линейная область ИВМ между линейной математической моделью и полиномиальной не оказывает эффекта на изменение структуры пустотного пространства. При появлении искривления ИВМ (нелинейности) можно говорить об увеличении сложности структуры пустотного пространства и влиянии ее на параметр пористости (рис. 2, 3).

По результатам дополнительного анализа ИВМ на нелинейность было отмечено:

- появление нелинейности ИВМ (начало кривизны) для типов коллекторов (рис. 2) и некоторых фациальных комплексов при $K_p=4$ %, что соотносится с граничным значением пород-коллекторов открытых месторождений изучаемого района и говорит об информативности предложенного подхода;
- при достижении $K_p=7$ % (рис. 3) увеличивается влияние порового и каверно-порового типа коллектора, что говорит об изменении/усложнении структуры пустотного пространства.

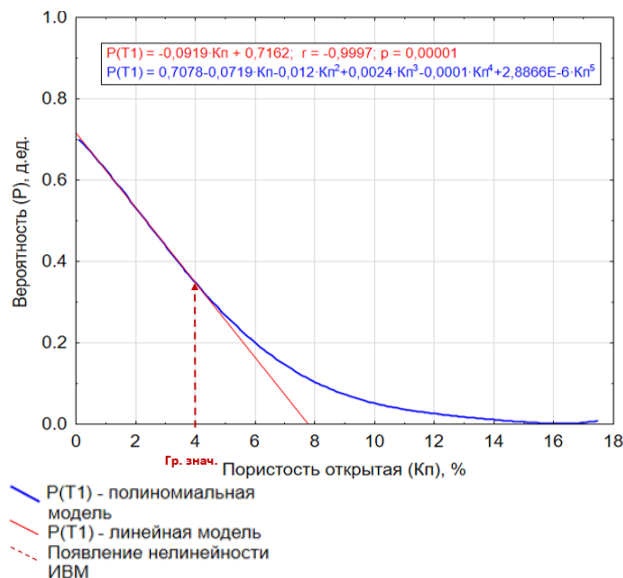


Рис. 2. Пример интерпретации индивидуальных вероятностных моделей по набору кривизны (трещинный тип)

Fig. 2. Example of interpretation of probabilistic models for the appearance of curvature (Fractured type)

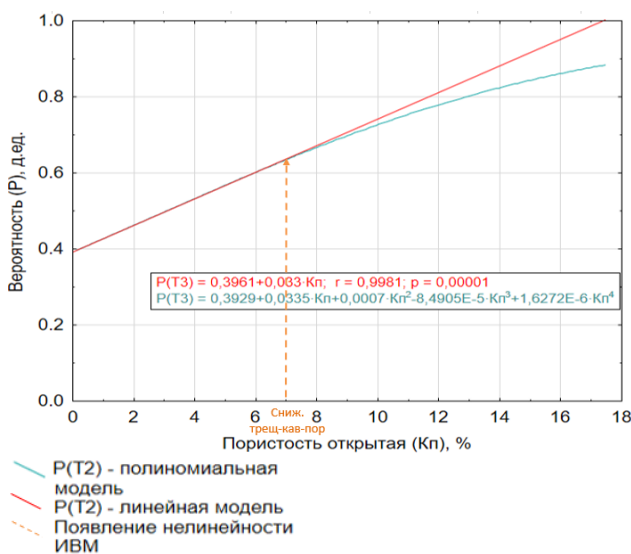


Рис. 3. Пример интерпретации индивидуальных вероятностных моделей по набору кривизны (поровый и каверно-поровый тип)

Fig. 3. Example of interpretation of probabilistic models for the appearance of curvature (porous and cavernous-porous type)

Таким образом, индивидуальные вероятностные модели способны охарактеризовать последовательное влияние на коэффициент открытой пористости трех различных факторов и в целом описывать вероятностную картину изменения структуры порового пространства.

Далее в корреляционном поле соотношения K_p и $K_{прг}$ выполнялось разделение фациальных комплек-

сов. Отмечено, что разделение невозможно в силу сложного строения карбонатных пород (табл. 1), претерпевающих вторичные изменения. Соответственно, фации не влияют на свойства (ФЕС) пород напрямую.

Далее для понимания сложности структуры пустотного пространства в корреляционном поле зависимости газопроницаемости от пористости были привлечены результаты типизации пустотного пространства (коллекторов). Согласно типизации коллекторов лабораторным путем было выделено три типа: трещинный, трещинно-каверново-поровый, каверново-поровый и поровый (рис. 4), которые определяют способность породы пропускать через себя флюид (проницаемость) [25]. Выделенные группы образцов по средним значениям групп выборок статистически различимы по K_n и $K_{прг}$.

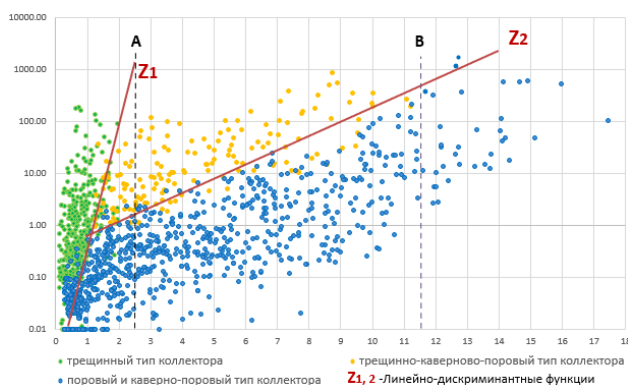


Рис. 4. Зависимость газопроницаемости от пористости по типам коллектора

Fig. 4. Gas permeability dependence on porosity by reservoir types

По исчезновению трещинно-каверново-порового типа коллектора была выделена граница В (рис. 4).

В интервалах пористости от 0 до 2,5 % (зона до А) выборка представлена всеми типами коллектора: трещинным, трещинно-каверново-поровым и каверново-поровым и поровым. В интервалах пористости от 2,5 до 11,5 % (зона между А и В) выборка представлена как трещинно-каверново-поровым, так и поровым и каверново-поровым типами коллектора, исчезает трещинный тип (подтверждается ИВМ, рис. 2). При пористости более 11,5 % (зона после В) выборка представлена только одним типом коллектора – поровым и каверново-поровым, отражая преобладание и влияние на пористость открытых пор и кавернозности. Исчезает трещинно-каверново-поровый тип коллектора, что отражено и на рис. 4. Выборка трещинно-каверново-порового и каверново-порового типов обладает более высокими значениями коэффициента абсолютной газопроницаемости, также в корреляционном поле

с 7 % наблюдается снижение количества образцов, представляющих трещинно-каверново-поровый тип коллектора, что подтверждается и по кривизне ИВМ (рис. 3). В результате наблюдается наследуемая зональность в ИВМ и распределении типов коллекторов в корреляционном поле, что говорит о тесной взаимосвязи геологических факторов и об информативности инструментов.

Для описания математическими моделями типов образцов по всей выборке был выполнен линейно-дискриминантный анализ [22, 26–32]. Получены линейно-дискриминантные функции (1), (2) (ЛДФ), качество классификации которых 76 и 71 %, что указывает на их статистическую значимость. ЛДФ для объекта D_{3fm_1} месторождений Южно-Хорейверского участка представлены ниже:

$$Z_1 = 0,0028 \cdot (\log_{10}(K_{прг})) - 0,36 \cdot K_n + 1,15, \quad (1)$$

$$clas = 76 \% ; Fp/Ft = 116,43, p < 10^{-6},$$

$$Z_2 = 0,049 \cdot K_n - 0,0135 \cdot (\log_{10}(K_{прг})) + 0,043, \quad (2)$$

$$clas = 71 \% ; Fp/Ft = 49,38, p < 10^{-6}.$$

Полученные ЛДФ в будущем могут быть использованы для классификации образцов месторождений Южно-Хорейверского участка.

На следующем этапе был построен график накопленной корреляции Пирсона [31, 32] от коэффициента открытой пористости и полиномиальные тренды (функции) в зонах до перегибов, отражая изменение структуры порового пространства за счет влияния различных факторов в разных диапазонах параметра (рис. 5). Графики накопленной корреляции Пирсона отсортировываются по одному из параметров (ФЕС) и по мере увеличения выборки позволяют зафиксировать взаимосвязь между двумя или несколькими параметрами, что делает данный метод взаимодополняющим для анализа и изучения структуры пустотного пространства пород.

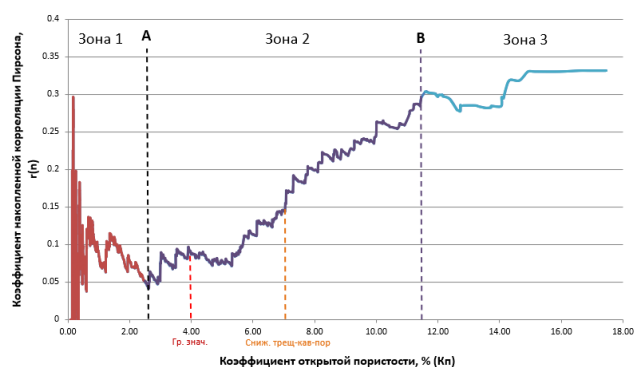


Рис. 5. График изменения коэффициента накопленной корреляции Пирсона от коэффициента открытой пористости

Fig. 5. Graph of the change in the cumulative Pearson correlation coefficient from the open porosity coefficient

График накопленной корреляции для выборки образцов месторождений Южно-Хорейверской площади позволил выделить три зоны изменения пустотного пространства, отображая взаимосвязь коэффициента открытой пористости и коэффициента газопроницаемости в разных диапазонах пористости. Зональность выполнена с учетом разрывов, перерывов и кривизны на графике [31, 32]. Также с помощью данных графиков можно оценить граничное значение ($K_p=4\%$) независимо от расчетных параметров для оценки запасов и выделения коллекторов по ГИС по уменьшению флуктуаций на графике накопленной корреляции (рис. 5) и по интерпретации нелинейности ИВМ (по кривизне) (рис. 2).

В диапазоне изменения пористости от 2,5 до 11,5 % по графику накопленной корреляции была выделена граница при $K_p=7\%$ по разрыву и значительному росту накопленной корреляции. Данная граница подтверждается интерпретацией нелинейности ИВМ (рис. 3) и по снижению трещинно-каверново-поровых образцов в корреляционном поле (рис. 4).

Исходя из наличия характерных границ изменения коэффициента открытой пористости (границ А, В) были выделены зоны 1–3 (рис. 5).

Зоны разных структур порового пространства по пористости: зона 1 – до 2,5 %, зона 2 – от 2,5 до 11,5 %, зона 3 – более 11,5 %. Для каждой зоны построены полиномиальные линии тренда с полиномом 5 и 6 порядков.

Зона 1:

$$r(n) = -0,0551 \cdot K_p^6 - 0,5015 \cdot K_p^5 + 1,8143 \cdot K_p^4 - 3,3051 \cdot K_p^3 + 3,1732 \cdot K_p^2 - 1,5081 \cdot K_p + 0,1787$$

$$R^2 = 0,1716$$

Зона 2:

$$r(n) = 0,0001 \cdot K_p^5 - 0,0045 \cdot K_p^4 + 0,0591 \cdot K_p^3 - 0,3637 \cdot K_p^2 + 1,0522 \cdot K_p - 1,0779$$

$$R^2 = 0,9854$$

Зона 3:

$$r(n) = 0,0001 \cdot K_p^6 - 0,0095 \cdot K_p^5 + 0,3607 \cdot K_p^4 - 7,2662 \cdot K_p^3 + 81,719 \cdot K_p^2 - 486,39 \cdot K_p - 1196,7$$

$$R^2 = 0,9332$$

Как видно из рис. 5, в зоне 1 наблюдается высокая дисперсия накопленных значений корреляции, где коэффициент детерминации составляет 0,17 – самый низкий из выделенных зон. В диапазоне пористости зоны 1 присутствуют все типы структур пустотного пространства, что видно и в корреляционном поле зависимости $K_{прг}$ от K_p по типам коллекторов (рис. 4). Согласно ИВМ, до 2,5 % пористости оказывают влияние трещинный тип коллектора (рис. 2) и фациальные комплексы – зарифовое мелководье (P(F3)), склон постройки (P(F5)) и глинисто-карбонатная порода (P(F7)).

В диапазоне пористости с 2,5 до 11,5 % зоны 2 отмечается уменьшение дисперсий корреляции до 4 %, незначительное уменьшение и затем рост накопленной корреляции. Коэффициент детерминации аппроксимирующего полинома уравнения составил 0,99. Для второй зоны характерно отсутствие образцов с трещинным типом коллектора, что подтверждается ИВМ трещинного типа коллектора (P (T1)) (рис. 1, 2) и влиянием трещинно-каверново-порового, порового и каверно-порового типов коллекторов. Для данной зоны, согласно ИВМ, отмечается влияние на пористость литотипа песчаника, фациальных комплексов – рифового шлейфа и врезового канала. 2 зона может быть разделена на подзоны в связи с характерными геологическими предпосылками при $K_p=4\%$ и $K_p=7\%$. При $K_p=4\%$ отмечается явное снижение дисперсии накопленной корреляции практически по линейному закону, что соотносится с граничным значением пород-коллекторов открытых месторождений и отмечено при интерпретации ИВМ по появлению ее нелинейности (набору кривизны) (рис. 2, 5). При $K_p=7\%$ наблюдается значительный рост накопленной корреляции, что объясняется снижением количества образцов, представляющих трещинно-каверново-поровый тип коллектора (рис. 3, 4). Согласно ИВМ (рис. 1) при более 7 % пористости также оказывает влияние рифовый шлейф с усложненной структурой пустотного пространства.

В зоне 3 после 11,5 % пористости наблюдается уменьшение темпов роста накопленной корреляции с просадкой параметра и дальнейшим инвариантным поведением до конца установленного диапазона пористости с коэффициентом детерминации 0,93. Зона 3 представлена преимущественно одним типом коллектора – поровым и каверно-поровым, что подтверждается типизацией в корреляционном поле (рис. 4).

Выделенные зоны на графике накопленной корреляции отражают последовательное изменение структуры порового пространства с увеличением коэффициента открытой пористости за счет влияния различных петролитотипов и фациальной принадлежности.

По результатам исследований отмечается, что ИВМ и накопленная корреляция являются информативными инструментами анализа и типизации взаимосвязи структуры порового пространства с фациями, литотипами и типами пустотного пространства. ИВМ позволяют восстановить, дополнить и объяснить кривые накопленных корреляций. Графики накопленной корреляции математически описывают изменение структуры пустотного пространства и позволяют уточнить границы ранее выделяемых зон, включая определение дополнительной зональности. Комплексное использование ИВМ и накопленной корреляции усиливает их ана-

литическую значимость и информативность. Взаимосвязь этих инструментов подтверждена результатами приведенного выше анализа.

Для количественного описания взаимосвязи геологических факторов (типа коллектора – P1, литологической – P2 и фациальной – P3 группы) применен множественный регрессионный анализ (пошаговая множественная регрессия). Пошаговая множественная регрессия позволяет определить влияние каждого критерия на каждом этапе на зависимый параметр. Впервые для сложнопостроенных карбонатных пород получены статистически значимые уравнения множественной корреляционной связи. Множественные регрессионные модели по открытой пористости представлены в табл. 3.

Таблица 3. Результаты множественного регрессионного анализа каждого геологического фактора и его совокупности

Table 3. Results of multiple regression analysis of each geological factor and its totality

Множественная регрессионная модель Multiple regression model	R	p	Fp/Ft
$K_p = 2,1 - 1,56 \cdot P(T2) + 1,17 \cdot P(T1) - 4,12 \cdot P(F5)$	0,813	$<10^{-6}$	1087,03
$K_p = -1,6 + 1,15 \cdot P(T1) - 0,71 \cdot P(T2) + 2,63 \cdot P(T3)$	0,813	$<10^{-6}$	1085,55
$K_p = 5,69 - 9,49 \cdot P(Lito2) - 1,8 \cdot P(Lito3)$	0,739	$<10^{-6}$	1077,19
$K_p = -28,07 + 37,3 \cdot P(F6) + 6,41 \cdot P(F3) + 13,9 \cdot P(F4)$	0,812	$<10^{-6}$	1143,92

Примечание: R – коэффициент множественной регрессии; p – уровень статистической значимости; Fp/Ft – соотношение эмпирического и теоретического критериев Фишера.

Note: R – multiple regression coefficient; p – level of statistical significance; Fp/Ft – ratio of empirical and theoretical Fisher criteria.

По результатам множественного регрессионного анализа отмечается высокий и статистически значимый коэффициент множественной регрессии – 0,81, по влиянию каждого геологического фактора отдельно и в совокупности на пористость полученных моделей. На пористость наибольшее влияние оказывает тип коллектора (трещинно-каверново-поровый, затем трещинный), затем уже фациальный комплекс (склон постройки). В табл. 3 также можно оценить степень влияния каждой критерия в геологическом факторе (типе коллектора, литологии и фациальном комплексе).

Впервые для карбонатных пород на графике накопленной корреляции во всем диапазоне параметра с помощью ИВМ от коэффициента открытой пористости были описаны и объяснены изменения углов наклона и другие эффекты. Учет геологических характеристик породы позволил почти полностью восстановить график накопленной корреля-

ции. По результатам выполненных исследований для карбонатных отложений отмечается смена влияния типа породы (пустотного пространства), затем литологии и фации на ФЕС.

Заключение

Выполнено разделение образцов керна на несколько групп по разным признакам и свойствам пород (геологическим факторам): по типу коллектора (типу пустотного пространства) на три группы, по литологическим свойствам на три группы, по фациальному комплексу на семь групп. Статистически значимое различие отмечается по K_p для всех групп, по $K_{прг}$ только для типов коллекторов. Группы по литологии и фациальным комплексам по $K_{прг}$ статистически не различимы, что связано со сложной структурой пустотного пространства. Построены индивидуальные вероятностные модели для пустотного пространства, литологии и фациального комплекса, согласно которым отмечаются закономерности влияния геологических групп на ФЕС. Для понимания природы изменения и усложнения структуры порового пространства выполнен дополнительный анализ нелинейности ИВМ от изменения K_p по набору кривизны при увеличении пористости. По результатам линейно-дискриминантного анализа для типов коллекторов были получены статистически значимые ЛДФ, позволяющие выполнить в дальнейшем типизацию образцов по пустотному пространству. С помощью графика накопленной корреляции Пирсона между открытой пористостью и газопроницаемостью, отсортированной по пористости, отмечены три зоны преобладания различных структур пустотного пространства, также получены полиномиальные функции. Метод накопленной корреляции также позволяет выполнять типизацию карбонатных пород-коллекторов по структуре порового пространства. Для сложнопостроенных карбонатных пород впервые выполнен множественный регрессионный анализ, отражающий совокупное и раздельное влияние на ФЕС геологических факторов: типа пустотного пространства, литологии и фациального комплекса. Множественные регрессионные модели для K_p имеют статистически значимый коэффициент множественной регрессии (0,81). Установлено, что комплексное использование накопленной корреляции и ИВМ является информативным аналитическим и математическим инструментом для типизации карбонатных пород-коллекторов и оценки связей и взаимовлияния геологических факторов в породе.

Результаты исследования лягут в основу типизации коллекторов по специальным методам ГИС и уверенного прогнозирования свойств пород-коллекторов при построении трехмерной геологической модели.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Экспериментальное изучение фильтрационных свойств анизотропных коллекторов углеводородного сырья / Н.М. Дмитриев, А.Н. Кузьмичев, Н.Н. Михайлов, В.М. Максимов // Бурение и нефть. – 2015. – № 11. – С. 6–9.
2. Fluid flow through carbonate rock systems / V.F. Samaniego, G.V. Chilingarian, S.J. Mazzullo, H.H. Rieke // Carbonate Reservoir Characterization: A Geologic-Engineering Analysis. P. I. – NY: Elsevier, 1992. – P. 439–503. DOI: 10.1016/S0376-7361(09)70133-5.
3. Kelton F. C. Analysis of fractured limestone cores, trans // AIME. – 1949. – P. 189–225.
4. McPhee C.A., Arthur K.G. Relative permeability measurements: an inter-laboratory comparison // European Petroleum Conference. – London, United Kingdom, 25–27 October, 1994. – P. 199–211. DOI: 10.2118/28826-MS.
5. Anderson M.A., Brent D., McLin R. Core truth in formation evaluation // Oilfield Review. – 2013. – Vol. 2. – P. 16–25.
6. Жемчугова В.А. Резервуарная седиментология карбонатных отложений. – М.: ЕАГЕ Геомодель, 2014. – 232 с.
7. Антошкина А.И. Рифообразование в палеозое (север Урала и сопредельные области). – Екатеринбург: Изд-во УрО РАН, 2003. – 303 с.
8. Багринцева К.И. Условия формирования и свойства карбонатных коллекторов нефти и газа. – М.: Изд-во РГГУ, 1999. – Ч. II. – 285 с.
9. Чехович П.А. Карбонатные платформы в раннепалеозойских осадочных бассейнах. Седиментационные характеристики и методы изучения // Жизнь Земли. Геология, геодинамика, экология, музеология: сб. науч. тр. Музея земледования. – М.: МГУ, 2010. – Т. 32. – С. 104–132.
10. Матвеева Н.А. Строение и условия образования фаменских карбонатных отложений Центрально-Хорейверской рифогенной зоны: автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – Сыктывкар, 2016. – 20 с.
11. Пармузина Л.В. Строение, условия формирования верхнедевонского комплекса Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции и прогноз коллекторов: автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – СПб, 2005. – 55 с.
12. Современные и ископаемые рифы. Термины и определения: Справочник / И.Т. Журавлева, В.Н. Космынин, В.Г. Кузнецов, Г.В. Беляева, К.Н. Волкова, Н.М. Задорожная, Г.Д. Исаев, И.К. Королюк, Е.В. Краснов, В.А. Лучинина, М.В. Михайлова, Е.И. Мягкова, Б.В. Преображенский, Т.А. Пунина, Ю.И. Тесаков, В.Г. Хромых, В.П. Шуйский. – М.: Недра, 1990. – 184 с.
13. Максимович Г.А., Быков В.Н. Карст карбонатных нефтегазоносных толщ. – Пермь: Пермский ун-т, 1978. – 96 с.
14. Maurice E.T., Wright V.P. Carbonate sedimentology. – Oxford; Boston: Blackwell Science Ltd, 1990. – 484 p.
15. Путилов И.С., Козлова И.А., Филькина Н.А. Использование методов литолого-фациального анализа для уточнения геологического строения карбонатных залежей месторождений Соликамской депрессии // Нефтепромысловое дело. – 2010. – № 7. – С. 32–36.
16. Комплексный подход к созданию трехмерных геологических моделей на примере месторождений Тимано-Печорского региона / С.В. Ладейщиков, А.П. Фадеев, Н.В. Дорофеев, И.С. Сабельников, Т.А. Жемчугова, А.П. Южаков // Бурение и нефть. – 2022. – № 12. – С. 14–21.
17. Повышение достоверности оценки запасов и ресурсов карбонатных отложений Южно-Хорейверского участка на основе новой концептуальной геологической модели / Т.А. Жемчугова, С.В. Ладейщиков, Н.В. Дорофеев, И.А. Юнин // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2023. – № 7 (379). – С. 19–26.
18. Жемчугова Т.А., Ладейщиков С.В., Дорофеев Н.В. Создание комплексной концептуальной модели рифовых отложений для повышения достоверности оценки запасов и ресурсов на территории Тимано-Печорской провинции // Геомодель-2023: сборник материалов конференции. – Геленджик: ЕАГЕ Геомодель, 2023. – С. 361–364.
19. Путилов И.С., Юрьев А.В., Винокурова Е.Е. Типизация терригенных пород-коллекторов с применением метода накопленной корреляции и индивидуальных моделей на примере месторождения им. Сухарева // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2023. – Т. 334. – № 1. – С. 75–83. DOI: 10.18799/24131830/2023/1/3797.
20. Повышение достоверности результатов физико-гидродинамических исследований / И.С. Путилов, И.П. Гурбатова, Н.А. Попов, Д.Б. Чижов, А.В. Юрьев // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2019. – Т. 19. – № 3. – С. 216–227. DOI: 10.15593/2224-9923/2019.3.2.
21. Разницын А.В. Повышение эффективности изучения карбонатных пород нефтегазовых залежей методом ядерного магнитного резонанса: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Пермь, 2021. – 19 с.
22. Попов Н.А. Разработка методов дифференциации пород-коллекторов по их петрофизическим свойствам для пермокарбонатовой залежи Усинского месторождения нефти: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Пермь, 2023. – 20 с.
23. Рыжов А.Е., Перунова Т.А., Орлов Д.М. Структура порового пространства пород-коллекторов Ботуобинского горизонта Чаяндинского месторождения // Научно-технический сборник Вести газовой науки. – 2011. – № 1. – С. 162–174.
24. Pore geometry of carbonate rocks and capillary pressure curves / R.L. Jodry, G.V. Cinilingarian, S.J. Mazzuiloand, H.H. Rieke // Carbonate Reservoir Characterization: A Geologic-Engineering Analysis. P. I. – Amsterdam: Elsevier, 1992. – 670 p. DOI: 10.1016/S0376-7361(09)70129-3.
25. Rabbani A., Babaei M., Javadpour F. A Triple Pore Network Model (T-PNM) for gas flow simulation in fractured, microporous and meso-porous media // Transp Porous Med. – 2020. – Vol. 132. – P. 707–740. DOI: 10.1007/s11242-020-01409-w.
26. Montgomery D.C., Peck E.A. Introduction to liner regression analysis. – New York: John Wiley & Sons, 1982. – 504 p.
27. Девис Дж.С. Статистический анализ данных в геологии. – М.: Недра, 1990. – Кн. 1. – 319 с.
28. Armstrong M. Basic linear geostatistics. – Berlin; Heidelberg: Springer, 1998. – 155 p.
29. Johnson N.L., Leone F.C. Statistics and experimental design. – New York, London, Sydney, Toronto: John Wiley & Sons, 1977. – 606 p.
30. Montgomery D.C., Peck E.A. Introduction to linear regression analysis. – New York: John Wiley & Sons, 1982. – 504 p.

31. Pearson K. On lines and planes of closest fit to systems of points in space. *Philosophical Magazine*. – 1901. – Ser. 6. – Vol. 2. – № 11. – P. 559–572.
32. Kork J.O. Examination of the Chayes–Kruskal procedure for testing correlations between proportions // *Journal of the International Association for Mathematical Geology*. – 1977. – Vol. 9. – № 6. – P. 543–562.

Информация об авторах

Иван Сергеевич Путилов, доктор технических наук, руководитель проекта (Геология, Пермский регион и Республика Коми) ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг», Россия, 614015, г. Пермь, ул. Пермская, 3а; профессор кафедры нефтегазового инжиниринга Пермского национального исследовательского политехнического университета, Россия, 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29. Ivan.Putilov@lukoil.com; <https://orcid.org/0009-0004-2265-6980>

Татьяна Анатольевна Жемчугова, аспирант Пермского национального исследовательского политехнического университета, Россия, 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29; геолог 1-й категории отдела геологического моделирования месторождений Республики Коми, Управление геологического моделирования, ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг», Россия, 614015, г. Пермь, ул. Пермская, 3а. Zhemchugova.tan@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0007-7363-8151>.

Поступила в редакцию: 27.06.2024

Поступила после рецензирования: 23.10.2024

Принята к публикации: 21.04.2025

REFERENCES

1. Dmitriev N.M., Kuzmichev A.N., Mikhaylov N.N., Maksimov V.M. Experimental study of filtration properties of anisotropic hydrocarbon reservoirs. *Burenie i neft*, 2015, no. 11, pp. 6–9. (In Russ.)
2. Samaniego V.F., Chilingarian G.V., Mazzullo S.J., Rieke H.H. Fluid flow through carbonate rock systems. *Carbonate Reservoir Characterization: A Geologic-Engineering Analysis*. P. I. New York, Elsevier, 1992. pp. 439–503. DOI: 10.1016/S0376-7361(09)70133-5.
3. Jodry R.L., Cinlingarian G.V., Mazzullo S.J., Rieke H.H. Pore geometry of carbonate rocks and capillary pressure curves. *Carbonate Reservoir Characterization: A Geologic-Engineering Analysis*. P. I. Amsterdam, Elsevier, 1992. 670 p. DOI: 10.1016/S0376-7361(09)70129-3.
4. McPhee C.A., Arthur K.G. Relative permeability measurements: an inter-laboratory comparison. *European Petroleum Conference*. London, United Kingdom, 25–27 October, 1994. pp. 199–211. DOI: 10.2118/28826-MS.
5. Anderson M.A., Brent D., McLin R. Core truth in formation evaluation. *Oilfield Review*, 2013, vol. 2, pp. 16–25.
6. Zhemchugova V.A. *Reservoir sedimentology of carbonate sediments*. Moscow, EAGE Geomodel Publ., 2014. 232 p. (In Russ.)
7. Antoshkina A.I. *Reef formation in the Paleozoic (northern Urals and adjacent areas)*. Ekaterinburg, UrO RAN Publ., 2003. 303 p. (In Russ.)
8. Bagrintseva K.I. *Conditions for the formation and properties of carbonate oil and gas reservoirs*. Moscow, RGGU Publ., 1999. Part II. 285 p. (In Russ.)
9. Chekhovich P.A. Carbonate platforms in early Paleozoic sedimentary basins. Sedimentation characteristics and study methods. *Life of the Earth. Geology, geodynamics, ecology, museology. Collection of scientific materials of the Museum of Geography*. Moscow, MGU Publ., 2010. Vol. 32, pp. 104–132. (In Russ.)
10. Matveeva N.A. *Structure and conditions of formation of Famennian carbonate deposits of the Central Khoreyver reef zone*. Cand. Diss. Abstract. Syktyvkar, 2016. 20 p. (In Russ.)
11. Parmuzina L.V. *Structure, formation conditions of the Upper Devonian complex of the Timan-Pechora oil and gas province and reservoir forecast*. Cand. Diss. Abstract. St Peterburg, 2005. 55 p. (In Russ.)
12. Zhuravleva I.T., Kosmynin V.N., Kuznetsov V.G., Belyaeva G.V., Volkova K.N., Zadorozhnaya N.M., Isaev G.D., Korolyuk I.K., Krasnov E.V., Luchina V.A., Mikhaylova M.V., Myagkova E.I., Preobrazhenskiy B.V., Punina T.A., Tesakov Yu.I., Khromykh V.G., Shuyskiy V.P. *Modern and fossil reefs. Terms and definitions: Directory*. Moscow, Nedra Publ., 1990. 184 p. (In Russ.)
13. Maksimovich G.A., Bykov V.N. *Karst of carbonate oil and gas-bearing series*. Perm, Perm State Gorky University Publ., 1978. 96 p. (In Russ.)
14. Maurice E.T., Wright V.P. *Carbonate sedimentology*. Oxford, Boston, Blackwell Science Ltd, 1990. 484 p.
15. Putilov I.S., Kozlova I.A., Filkina N.A. *Application of lithological-facies analysis methods to refine the geological structure of carbonate reservoirs in the Solikamsk Depression*. *Oilfield Engineering*, 2010, no. 7, pp. 32–36. (In Russ.)
16. Ladeyshchikov S.V., Fadeev A.P., Dorofeev N.V., Sabelnikov I.S., Zhemchugova T.A., Yuzhakov A.P. An integrated approach to creating three-dimensional geological models using the example of deposits in the Timan-Pechora region. *Burenie i neft*, 2022, no. 12, pp. 14–21. (In Russ.)
17. Zhemchugova T.A., Ladeyshchikov S.V., Dorofeev N.V., Yunin I.A. Increasing the reliability of the assessment of reserves and resources of carbonate deposits of the Yuzhno-Khoreyversky area based on a new conceptual geological model. *Geology, geophysics and development of oil and gas fields*, 2023, no. 7 (379), pp. 19–26. (In Russ.)
18. Zhemchugova T.A., Ladeyshchikov S.V., Dorofeev N.V. Creation of a comprehensive conceptual model of reef sediments to improve the reliability of reserves and resources assessment in the Timan-Pechora province. *Geomodel-2023. Collection of conference materials*. Gelendzhik, EAGE Geomodel Publ., 2023. pp. 361–364. (In Russ.)

19. Putilov I.S., Yurev A.V., Vinokurova E.E. Typing of terrigenous reservoir rocks using the accumulated correlation method and individual probabilistic models on the example of field named after Sukharev. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2023, vol. 334, no. 1, pp. 75–83. (In Russ.) DOI: 10.18799/24131830/2023/1/3797.
20. Putilov I.S., Gurbatova I.P., Popov N.A., Chizhov D.B., Yurev A.V. Increasing the reliability of the results of physical and hydrodynamic studies. *Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering*, 2019, vol. 19, no. 3, pp. 216–227. (In Russ.) DOI: 10.15593/2224-9923/2019.3.2.
21. Raznitsyn A.V. *Increasing the efficiency of studying carbonate rocks of oil and gas deposits using nuclear magnetic resonance*. Cand. Diss. Abstract. Perm, 2021. 19 p. (In Russ.)
22. Popov N.A. *Development of methods for differentiating reservoir rocks by their petrophysical properties for the Permocarbon reservoir of the Usinsk oil field*. Cand. Diss. Abstract. Perm, 2023. 20 p. (In Russ.)
23. Ryzhov A.E., Perunova T.A., Orlov D. M. Structure of the pore space of reservoir rocks of the Botuobinsky horizon of the Chayandinskoye field. *Scientific and technical collection of Vesti gazovoy nauki*, 2011, no. 1, pp. 162–174. (In Russ.)
24. Jodry R.L., Cinilingarian G.V., Mazzuloand S.J., Rieke H.H. Pore geometry of carbonate rocks and capillary pressure curves. *Carbonate Reservoir Characterization: A Geologic-Engineering Analysis*. Part I. Amsterdam, Elsevier, 1992. 670 p.
25. Rabbani A., Babaei M., Javadpour F. A Triple Pore Network Model (T-PNM) for gas flow simulation in fractured, microporous and meso-porous media. *Transp Porous Med*, 2020, vol. 132, pp. 707–740. DOI: 10.1007/s11242-020-01409-w.
26. Montgomery D.C., Peck E.A. *Introduction to linear regression analysis*. New York, John Wiley & Sons, 1982. 504 p.
27. Devis Dzh.S. *Statistic and data analysis in geology*. Moscow, Nedra Publ., 1990. Vol. 1. 319 p. (In Russ.)
28. Armstrong M. *Basic linear geostatistics*. Berlin, Heidelberg, Springer, 1998. 155 p.
29. Johnson N.L., Leone F.C. *Statistics and experimental design*. New York, London, Sydney, Toronto, John Wiley & Sons, 1977. 606 p.
30. Montgomery D.C., Peck E.A. *Introduction to linear regression analysis*. New York, John Wiley & Sons, 1982. 504 p.
31. Pearson K. On lines and planes of closest fit to systems of points in space. *Philosophical Magazine*, 1901, Ser. 6, vol. 2, no. 11, pp. 559–572.
32. Kork J.O. Examination of the Chayes–Kruskal procedure for testing correlations between proportions. *Journal of the International Association for Mathematical Geology*, 1977, vol. 9, no. 6, pp. 543–562.

Information about the authors

Ivan S. Putilov, Dr. Sc., Associate Professor, Project Manager (Geology, Perm region and Komi Republic) OOO LUKOIL-Engineering, 3a, Permskaya street, Perm, 614015, Russian Federation; Professor, Perm National Research Polytechnic University, 29 Komsomolskiy avenue, Perm, 614990, Russian Federation; Ivan.Putilov@lukoil.com; <https://orcid.org/0009-0004-2265-6980>

Tatyana A. Zhemchugova, Postgraduate Student, Perm National Research Polytechnic University, 29 Komsomolskiy avenue, Perm, 614990, Russian Federation; geologist of the 1st category, OOO LUKOIL-Engineering, 3a, Permskaya street, Perm, 614015, Russian Federation; Zhemchugova.tan@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0007-7363-8151>.

Received: 27.06.2024

Revised: 23.10.2024

Accepted: 21.04.2025

УДК 669.793
DOI: 10.18799/24131830/2025/7/4745
Шифр специальности ВАК: 2.6.7
Научная статья

Комплексная технология переработки диопсида с получением скандиевого концентрата и минеральных продуктов

А.Д. Зайцева^{1✉}, Е.Н. Кузин¹, Н.Е. Кручинина¹, С.С. Галактионов², А.Н. Краснощеков²

¹ Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Россия, г. Москва

² Акционерное общество «Леолы Кэпитал Групп», Россия, г. Москва

✉ zaicevaaleksandra95@gmail.com

Аннотация. Актуальность. Вопросам поиска новых сырьевых источников редкоземельных и рассеянных металлов уделяется все больше внимания. Диопсид – новый и весьма перспективный источник добычи соединений скандия, позволяющий получать широкий спектр неорганических продуктов, обеспечивающих экономическую целесообразность производства. **Цель.** Разработка комплексной энерго- и ресурсосберегающей технологии переработки диопсида с получением скандиевого концентрата и широкого спектра неорганических продуктов. **Методы.** Для исследования состава кислых растворов использовали метод атомно-эмиссионной спектроскопии с магнитной плазмой. **Результаты и выводы.** Получены образцы импрегнатов на основе макропористых активированных углей, пропитанных смесью Д23ДФК/ТБФ. Полученные образцы продемонстрировали высокую емкость по отношению к соединениям скандия, а отказ от жидкостной экстракции позволит существенно повысить уровень производственной безопасности. Использование двух инновационных реэкстрагентов на основе смеси аммонийных солей или оксиэтилидендифосфоновой кислоты позволяет улучшить экологические и экономические показатели процесса реэкстракции. Впервые предложена технология соосаждения соединений скандия с использованием оксидов кальция/магния. Прокаленный скандийсодержащий концентрат содержит от 0,8 до 1,4 % скандия. Маточные растворы процесса вскрытия могут быть нейтрализованы с использованием магнийсодержащих отходов с получением сульфата магния – ценного материала для строительной, сельскохозяйственной и иных отраслей промышленности. Осадки процесса нейтрализации могут быть частично возвращены на стадию вскрытия диопсида или использованы в качестве сырья для производства комплексных титансодержащих коагулянтов. Разработанная на основе совокупности технологических приемов концепт-схема является комплексной и сопровождается минимальным образованием сточных вод и твердых отходов.

Ключевые слова: диопсид, скандий, импрегнат, реэкстракция, сульфат магния

Для цитирования: Комплексная технология переработки диопсида с получением скандиевого концентрата и минеральных продуктов / А.Д. Зайцева, Е.Н. Кузин, Н.Е. Кручинина, С.С. Галактионов, А.Н. Краснощеков // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 6. – С. 69–77. DOI: 10.18799/24131830/2025/7/4745

UDC 669.793
DOI: 10.18799/24131830/2025/7/4745
Scientific paper

Complex technology for processing diopside to produce scandium concentrate and mineral products

A.D. Zaytseva^{1✉}, E.N. Kuzin¹, N.E. Kruchinina¹, S.S. Galaktionov², A.N. Krasnoshchekov²

¹ D.I. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russian Federation

² LTD «Leoli Capital Group», Moscow, Russian Federation

✉ zaicevaaleksandra95@gmail.com

Abstract. Relevance. More and more attention is being paid to the search for new raw materials sources of rare earth and trace metals. Diopside is a new and very promising source for the extraction of scandium compounds, which makes it possible to obtain a wide range of inorganic products that ensure economic feasibility of production. **Aim.** Development of a comprehensive energy- and resource-saving technology for diopside processing to produce scandium concentrate and a wide range of inorganic products. **Methods.** To study the composition of acidic solutions, the method of atomic emission spectroscopy with magnetic plasma was used. **Results and conclusions.** The authors have obtained the samples of impregnates based on macroporous activated carbons impregnated with a D2EDPA/TBP mixture. The obtained samples demonstrated a high capacity with respect to scandium compounds, and the abandonment of liquid extraction will significantly increase the level of industrial safety. The use of two innovative re-extractants based on a mixture of ammonium salts or oxyethylidene diphosphonic acid makes it possible to improve the environmental and economic performance of re-extraction. The authors proposed the technology for co-precipitation of scandium compounds using calcium/magnesium oxides. Calcined scandium-containing concentrate contains from 0.8 to 1.4% scandium. The mother liquors of the opening process can be neutralized using magnesium-containing waste to obtain magnesium sulfate, a valuable material for construction, agricultural and other industries. The residues from neutralization can be partially returned to the stage of opening the diopside or used as raw materials for the production of complex titanium-containing coagulants. Developed on the basis of a set of technological methods, the concept scheme is comprehensive and is accompanied by minimal generation of wastewater and solid waste.

Keywords: diopside, scandium, impregnate, stripping, magnesium sulfate

For citation: Zaytseva A.D., Kuzin E.N., Kruchinina N.E., Galaktionov S.S., Krasnoshchekov A.N. Complex technology for processing diopside to produce scandium concentrate and mineral products. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 7, pp. 69–77. DOI: 10.18799/24131830/2025/7/4745

Введение

Реализация концепций устойчивого развития и Zero Waste делает все более актуальным вопрос комплексной переработки минерального сырья. Миллионы тонн «некондиционных» концентратов (отходов) и вскрышных пород извлекаются в процессе добычи целевого компонента и за неимением подходящих технологий переработки размещаются на постоянное хранение на хвостохранилищах и шлакоотвалах предприятий, приобретая статус отходов.

С учетом необходимости перехода к экономике замкнутого цикла, сложной геополитической ситуацией и глобальными геополитическими вызовами основной задачей России является самообеспечение всеми стратегическими ресурсами. Именно по уровню развития науки и техники в направлении комплексной переработки сырья и промышленных отходов можно судить о стабильности промышленного производства страны.

Наиболее уязвимыми направлениями сырьевой безопасности большинства стран являются производства редкоземельных (РЗЭ) и рассеянных металлов. Данные металлы широко востребованы в аэрокосмической, электротехнической, медицинской и других инновационных отраслях. Даже при наличии существенных запасов минералов большинство стран не имеет экономически обоснованной технологии их переработки с извлечением РЗЭ. Именно поэтому большая часть стран зависима от поставок из Китая – монополиста на рынке переработки и продажи редкоземельных концентратов.

Одним из наиболее востребованных РЗЭ является скандий [1–3]. Высокий спрос на данный металл обусловлен его необычными свойствами. До-

бавка всего 2–5 мас. % к алюминию позволяет значительно увеличить прочность сплава, что делает полученный материал жизненно важным для самолето-, ракето- и автомобилестроения.

В настоящее время разработано несколько лабораторных и полупромышленных технологий добычи скандия из широкого спектра техногенных отходов [4]. Красный шлам [5], зола ТЭЦ [6], гидролизная серная кислота и ильменитовые шлаки [7, 8], бокситы [9, 10], кремнистые остатки [11] и даже маточные растворы подземного выщелачивания урана [12, 13] – вот основные источники добычи скандия, рассматриваемые в настоящее время.

Производство скандия – сложный, многостадийный процесс, включающий жидкостную экстракцию растворами фосфорорганических кислот в керосине и рекстракцию высокотоксичным и дорогостоящим фтороводородом [14–16]. Применение процессов твердофазной экстракции с использованием коммерческих смол, несмотря на высокую эффективность, отличается высокой стоимостью и сложной аппаратурной схемой. Учитывая вышесказанное, можно сделать вывод, что высокий уровень промышленной и экологической опасности, а также низкая рентабельность процессов существенно тормозят их внедрение в промышленность.

В качестве альтернативного и перспективного источника соединений скандия можно выделить диопсид ($\text{CaMg}(\text{Si}_2\text{O}_6)$) – минерал из группы пироксенов, содержание соединений скандия в котором достигает 200 г/т. Высокая химическая активность и наличие легкоизвлекаемых соединений магния делают диопсид одним из возможных источников для добычи соединений скандия и реали-

зации комплексной переработки минерального сырья.

Основной целью данного исследования является разработка комплексной энерго- и ресурсосберегающей технологии переработки диопсида с получением скандиевого концентрата и широкого спектра неорганических продуктов.

Материалы и методы исследования

Объект исследования – диопсид Качканарского месторождения с содержанием соединений скандия 120 г/т. Скандийсодержащие растворы получали обработкой измельченного до 75 мкм диопсида 40–50 %-ным раствором H_2SO_4 с добавкой 20 г/дм³ фторсиликата натрия при температуре 95 °С в течение 5–6 часов и Т:Ж 1:1 (рис. 4, стадия 1). Полученную пульпу разбавляли, декантировали, фильтровали и направляли на извлечение соединений скандия (рис. 4, стадия 2).

Определение содержания металлов в кислых растворах проводили методом атомно-эмиссионной спектроскопии с магнитной плазмой на приборе Спектроскай (г. Королев, Россия) [17–19].

Процесс твердофазной экстракции проводили в ионообменной колонке высотой 45 см; высотой загрузки 40 см; сечением 2,5 см²; объем твердого экстрагента 100 см³; линейная скорость фильтрации 2 м/ч. В качестве твердого экстрагента использовали твердый углеродный экстрагент (ТВЭКС-У) (плотность 1,05 г/дм³) на основе макропористого активированного угля, импрегнированного эквимолярной смесью ди2Этилгексилфосфоновой кислоты (Д2ЭГФК) и трибутилфосфата (ТБФ). В качестве образца сравнения был выбран коммерческий твердый экстрагент (ТВЭКС-С) на основе стиролдивинилбензольной матрицы и Д2ЭГФК/ТБФ (рис. 4, стадия 3).

Реэкстракцию соединений скандия из ТВЭКС-С/ТВЭКС-У проводили раствором оксиэтилендифосфоновой кислоты (ОДФК) с концентрацией 330 г/дм³ или смесью 8 %-ного раствора бифторида аммония с добавкой 100 г/дм³ сульфата аммония (рис. 4, стадия 4).

Нейтрализацию маточного раствора проводили в реакторе с верхнеприводной мешалкой, оборудованном датчиком контроля pH на базе иономера И-160 (Россия). Образующиеся труднорастворимые продукты декантировали, а полученный раствор фильтровали на вакуумном фильтре.

Сушку маточных растворов проводили при помощи лабораторного ротерного испарителя Stegler R I-213 (Китай).

Элементный состав твердых образцов определяли на рентгенофлуоресцентном электронном микроскопе JEOL1610LV с энергодисперсионной приставкой SSD X-MaxIncaEnergy (JEOL, Япония;

Oxford Instruments, Великобритания). Фазовый состав определяли на рентгеновском дифрактометре ДРОН-3 Н (Россия).

Результаты и их обсуждение

Химический состав растворов сернокислотного вскрытия диопсида, используемых в экспериментах, представлен в табл. 1.

Таблица 1. Химический состав раствора процесса переработки диопсида с попутным извлечением скандия

Table 1. Chemical composition of the diopside processing solution with associated scandium extraction

Показатель/Index	Sc	Ti	Ca	Fe	Mg	Al	H ₂ SO ₄	F ⁻
Содержание, г/дм ³ Content, g/dm ³	0,014	0,65	0,42	10,1	17,9	6,15	116,4	21,1

Из данных табл. 1 видно, что содержание соединений скандия в технологических растворах не превышает 15 мг/дм³, а значит, применение жидкостной экстракции нецелесообразно как с технологической, так и с экономической точки зрения.

С целью повышения уровня производственной безопасности было принято решение об отказе от использования жидкофазной экстракции в пользу твердофазной. Данные по полной обменной емкости представлены на графике рис. 1.

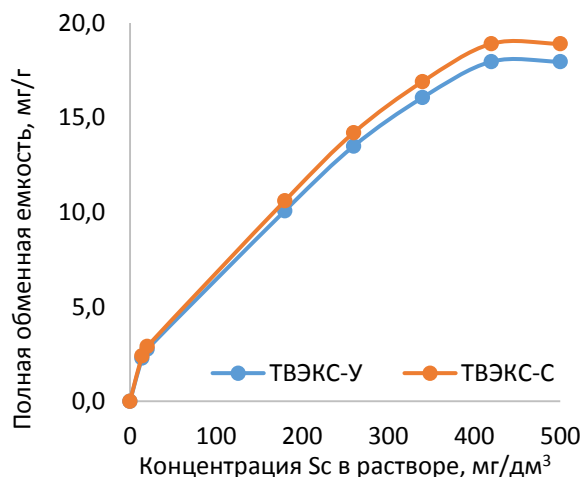


Рис. 1. Полная обменная емкость образцов
Fig. 1. Total sample exchange capacity

Из представленных на рис. 1 данных видно, что по своей эффективности предлагаемый ТВЭКС-У не уступает коммерческому ТВЭКС-С, при этом стоимость ТВЭКС-У в среднем в 10 раз ниже. Немаловажен тот факт, что в случае нарушения технологических условий и вымывания экстракции

онной смеси с поверхности ТВЭКС-У возможно восстановить его свойства в процессе повторной пропитки. Нарушение режимов эксплуатации ТВЭКС-С ведет к полной утрате его свойств и необходимости полной замены, что с учетом высокой стоимости реагента можно считать экономическим риском. Кроме того, ТВЭКС-У обладает дополнительным преимуществом по сравнению с ТВЭКС-С, так как первый имеет большую плотность и не всплывает на поверхности технологических растворов. Это позволяет упростить аппаратное решение для ведения технологического процесса. Селективность извлечения скандия ТВЭКС-У превышает 95–99 %, при этом наблюдается минимальная (1–3 %) экстракция алюминия, железа, кальция и магния.

Результаты исследования динамической емкости приведены на графике рис. 2.

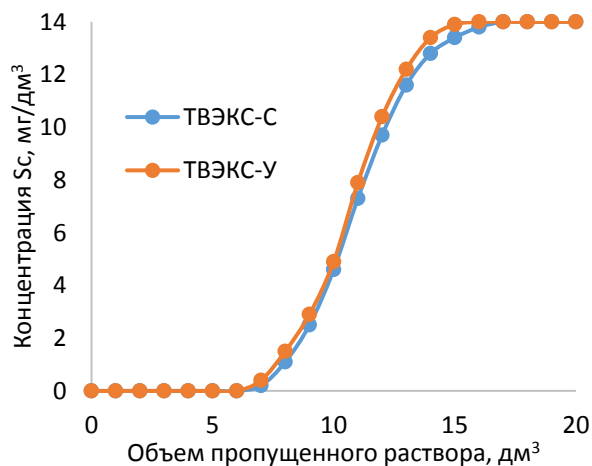


Рис. 2. Экстракция скандия из сернокислотного раствора вскрытия диопсида

Fig. 2. Scandium extraction from sulfuric acid solution of diopside opening

Из данных рис. 2 видно, что по эффективности экстракции ТВЭКС-У незначительно уступает коммерческому ТВЭКС-С, при этом динамическая обменная емкость для образца ТВЭКС составила 2,05 мг/г, а для ТВЭКС-У – 1,95 мг/г.

Исследование процесса реэкстракции соединений скандия растворами ОДФК или смесью аммонийных солей с поверхности ТВЭКС-У и ТВЭКС-С проводили в динамическом режиме в описанной ранее колонке. Режим пропускания жидкости – противоток, линейная скорость 4 м/ч. Полученные в результате эксперимента кривые извлечения скандия представлены на рис. 3.

Из данных графика рис. 3 видно, что процесс реэкстракции при использовании ОДФК протекает более интенсивно в сравнении с фторидным реэкс-

трагентом. Данное явление можно объяснить образованием более прочных комплексов скандия с молекулами ОДФК.

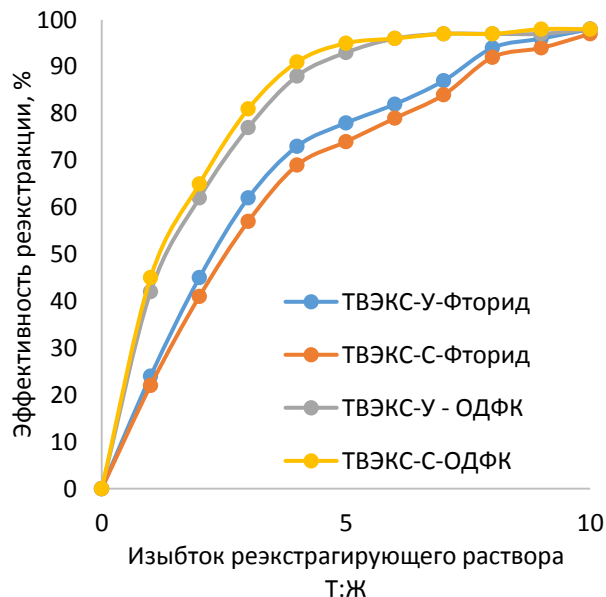


Рис. 3. Реэкстракция скандия с поверхности ТВЭКС-С и ТВЭКС-У

Fig. 3. Scandium re-extraction from the surface of TVEX-S and TVEX-C

Осаждение соединений скандия из полученных растворов десорбции ОДФК проводили оксидами кальция и магния при соотношении Т:Ж 1:25 (рис. 4, стадия 5). Полученные осадки прокаливали при 1100 °С в течение 2 часов с получением скандийсодержащего концентрата (рис. 4, стадия 6). Результаты эксперимента представлены в табл. 2. По своему химическому составу скандийсодержащий концентрат представляет собой смесь фосфатов скандия и металла-осадителя (кальция/магния).

Таблица 2. Эффективность осаждения соединений скандия из реэкстрактов

Table 2. Efficiency of precipitation of scandium compounds from re-extracts

Реэкстрагент-осадитель Re-extractant-precipitator	Эффективность осаждения Sc из реэкстрактов Efficiency of Sc precipitation from re-extracts	Содержание Sc в концентрате Sc content in concentrate
	%	
ОДФК-CaO ODFK -CaO	75	1,31
ОДФК-MgO ODFK-MgO	99	1,92
Фторид-CaO Fluoride-CaO	91	0,82
Фторид-MgO Fluoride-MgO	99	0,91

Из данных табл. 2 видно, что применение оксидов кальция и магния в качестве осадителей позволяет количественно выделять соединения скандия, при этом эффективность соединений магния выше, чем у соединений кальция, что объясняется более прочными комплексами в системе ОДФК/фторид-магний-скандий.

После экстракции рафинат, обедненный по скандию, представляет собой сульфатный раствор магния, кальция, алюминия и железа с высоким содержанием свободной серной кислоты (110 г/дм^3) и относительно низким содержанием фторидов. Нейтрализацию рафината (рис. 4, стадия 7) проводили суспензией оксида магния или бруситсодержащим отходом производства огнеупоров до pH 7,5–8,0 [19]. Данные по остаточным содержаниям металлов и расходу нейтрализующего реагента представлены в табл. 3.

Полученные результаты (табл. 3) свидетельствуют о том, что содержание магния в растворе составляет 40–45 г/л, или 400–500 г/л по $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, а содержание других металлов находится на уровне примесей.

Химический анализ высушенного осадка процесса нейтрализации (рис. 4, стадия 8) показал, что основными фазами являются непрореагировавший оксид магния и смесь фторидов магния, кальция, алюминия и титана. Данный отход может быть использован в качестве фторсодержащего сырья и направлен обратно на стадию сернокислотного вскрытия диопсида для получения более концентрированных по магнию растворов. Возврат отхода на стадию вскрытия будет иметь технологическое преимущество, поскольку позволит рекуперировать большую часть фторидов и магния, а значит, значительно снизить стоимость производства.

Таблица 3. Химический состав растворов, полученных нейтрализацией рафината магнийсодержащими реагентами
Table 3. Chemical composition of solutions obtained by neutralizing raffinate with magnesium-containing reagents

Реагент для нейтрализации Neutralization reagent	Содержание, г/дм ³ /Content, g/dm ³						Расход осадителя, г/дм ³ Precipitant consumption, g/dm ³
	Sc	Ti	Ca	Fe	Mg	Al	
Осаждение MgO/MgO precipitation	0,0001	<0,1	0,26	<0,2	43,1	<0,1	140
Осаждение бруситсодержащим отходом Precipitation by brucite-containing waste	0,0001	<0,1	0,39	<0,2	41,4	<0,1	155

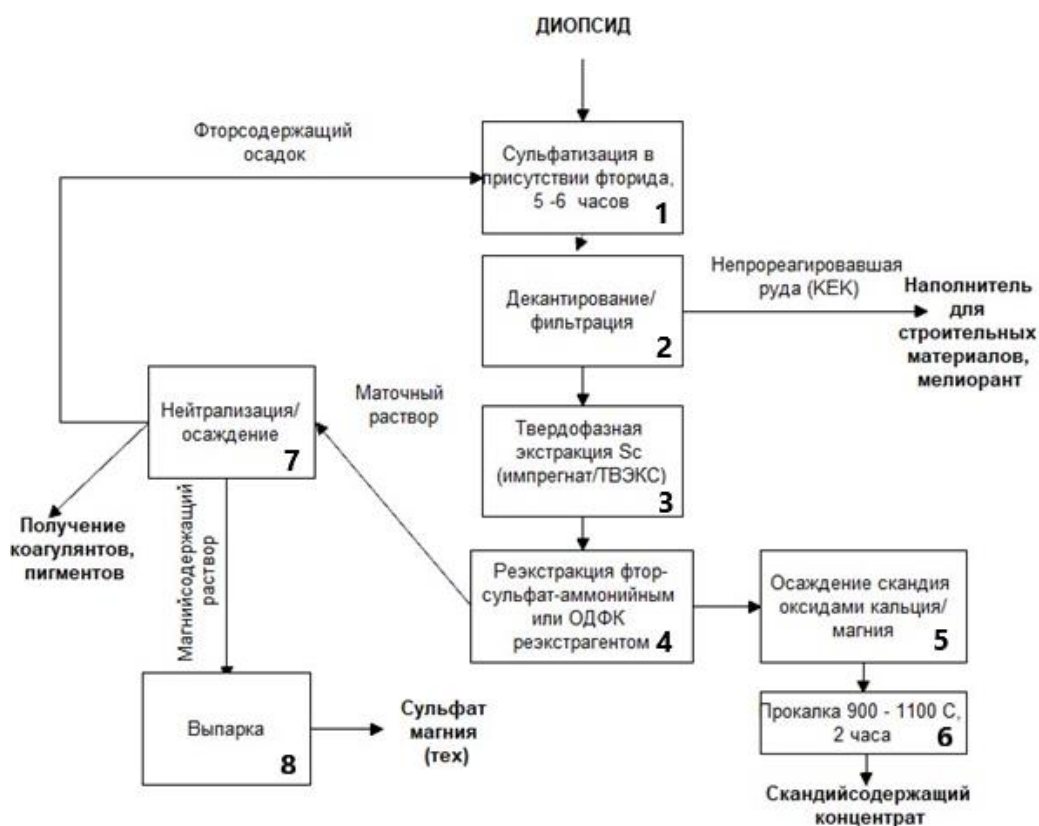


Рис. 4. Схема комплексной переработки диопсида
Fig. 4. Scheme of complex diopside processing

В качестве альтернативного и весьма перспективного направления использования алюмо-железо-титанового осадка можно выделить получение комплексных коагулянтов и их использование для очистки оборотной воды технологического цикла переработки диопсида [20, 21]. Применение высокоэффективных коагулянтов позволит снизить объемы сточных вод и водопотребления и организовать цикл оборотного водоснабжения [22].

Полученные магниенасыщенные растворы высушивали и анализировали на содержание основных компонентов.

Твердый продукт содержал: 94,5 % сульфата магния; 1,8 % диоксид кремния; 0,8 % сульфата кальция; 0,5 % гидроксидов железа и 2,4 % примесей оксидов сульфатов алюминия, калия, натрия и пр.

Продукт, полученный при нейтрализации рафината бруситсодержащим отходом, содержал 92,9 %, сульфата магния 2,1 % диоксид кремния, 1,3 % сульфата кальция, 0,4 % гидроксидов железа и 3,3 % примесей оксидов сульфатов алюминия, калия, натрия и пр.

Таким образом, можно сделать вывод, что полученный сульфат магния имеет низкое содержание примесных элементов и, вероятно, может быть использован в качестве добавок к магниезальным цементам, в целлюлозно-бумажной, текстильной промышленности и при условии доочистки в качестве минерального удобрения.

Все описанные технологические решения (рис. 4) позволят организовать малоотходное производство соединений скандия.

Заключение

В рамках проделанной работы проведен полный цикл исследований по организации энерго- и ресурсосберегающей технологии переработки диопсида с получением скандийсодержащих концентратов

и крупнотоннажных неорганических продуктов.

Отказ от жидкостной экстракции в пользу твердофазной позволит значительно упростить технологическую схему производства и повысить уровень производственной и экологической безопасности. Предложенный ТВЭКС-У на основе макропористого угля по своей емкости лишь незначительно уступает коммерческому ТВЭКС-С при разнице в стоимости почти в 10 раз. Отдельно необходимо отметить, что использование ТВЭКС-У не внесет дополнительных примесей в состав получаемых скандийсодержащих продуктов.

Предложенное инновационное решение по рекстракции соединений скандия с использованием фтор-сульфат-аммонийной системы и оксидилендифосфоновой кислоты позволит не только эффективно извлекать скандий с поверхности ТВЭКС-С/ТВЭКС-У (99 %), но и значительно снизить стоимость процесса и повысить его экологичность.

Применение в качестве щелочного-нейтрализующего реагента бруситсодержащих отходов позволит получать высококонцентрированные магниесодержащие растворы, которые после сушки могут быть использованы в различных отраслях промышленности.

Осадки процесса нейтрализации могут быть использованы для производства инновационных комплексных титансодержащих коагулянтов, железосодержащего сырья или возвращены на стадию вскрытия для снижения расхода фторидов.

Описанная в рамках работы комплексная система переработки диопсида позволит сделать шаг к реализации концепции Zero Waste и экономики замкнутого цикла, а также восполнить потребности РФ в стратегическом скандиевом сырье [23, 24].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Rare earth elements recovery from primary and secondary resources using flotation: a systematic review / P. Julapong, A. Numprasanthai, L. Tangwattananukul, O. Juntarasakul, P. Srichonphaisarn, K. Aikawa, I. Park, M. Ito, C.B. Tabelin, T. Phengsaart // *Appl. Sci.* – 2023. – Vol. 13. – № 8364. DOI: <https://doi.org/10.3390/app13148364>
2. Sager M., Wiche O. Rare Earth Elements (REE): origins, dispersion, and environmental implications – a comprehensive review // *Environments.* – 2024. – Vol. 11. – № 24. DOI: <https://doi.org/10.3390/environments11020024>
3. Balaram V. Potential future alternative resources for rare earth elements: opportunities and challenges // *Minerals.* – 2023. – Vol. 13. – № 3. – P. 425.
4. Process evaluation of scandium production and its environmental impact / A. Ghosh, S. Dhiman, A. Gupta, R. Jain // *Environments.* – 2023. – Vol. 10. – № 8. DOI: <https://doi.org/10.3390/environments10010008>
5. Research on high-pressure hydrochloric acid leaching of scandium, aluminum and other valuable components from the non-magnetic tailings obtained from red mud after iron removal / D. Zinoveev, P. Grudinsky, E. Zhiltsova, D. Grigoreva, A. Volkov, V. Dyubanov, A. Petelin // *Metals.* – 2021. – Vol. 11. – № 469. DOI: <https://doi.org/10.3390/met11030469>
6. Разработка комплексной технологии выщелачивания редкоземельных металлов из золотшлаков и проблема концентрирования растворов этих металлов / Б.С. Ксенофонов, А.С. Козодаев, Р.А. Таранов, М.С. Виноградов, А.А. Воробаева, Е.В. Сеник // *Современные наукоемкие технологии.* – 2016. – № 3-1. – С. 44–49.
7. Obtaining scandium concentrate by liquid extraction from hydrolytic sulphuric acid effluents from titanium dioxide production / I.D. Akimova, G.M. Chumakova, T.V. Molchanova, V.V. Golovko // *Non-ferrous metals.* – 2017. – Vol. 3. – P. 63–68

8. Features of scandium extraction from hydrolysis waste streams of titanium production / A.S. Nemtsev, A.S. Sibilev, A.V. Smirnov, A.V. Nechaev, S.V. Shestakov // *Proceedings of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. – 2018. – Vol. 9. – Iss. (2-1). – P. 332–336.
9. Extraction of scandium from scandium-rich material derived from bauxite ore residues / G. Li, Q. Ye, B. Deng, J. Luo, M. Rao, Z. Peng, T. Jiang // *Hydrometallurgy*. – 2018. – Vol. 176. – P. 62–68.
10. Zhang N., Li H.-X., Liu X.-M. Recovery of scandium from bauxite residue – red mud: a review // *Rare Metals*. – 2016. – Vol. 35. – Iss. 12. – P. 887–900.
11. Use of machining to increase the recovery of scandium from refractory silicate raw material / S.I. Stepanov, Kh. P'ei, A.V. Boyarintsev, V.G. Giganov, A.M. Chekmarev, M.M. Aung // *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. – 2018. – Vol. 52. – Iss. 5. – P. 973–977.
12. Deactivation of the scandium concentrate recovered from uranium leach liquors / V.N. Rychkov, V.S. Semenishchev, M.A. Mashkovtsev, E.V. Kirillov, S.V. Kirillov, G.M. Bunkov, M.S. Botalov // *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. – 2016. – Vol. 310. – Iss. 3. – P. 1247–1253.
13. Study of scandium and thorium sorption from uranium leach liquors / A.L. Smirnov, S.M. Titova, V.N. Rychkov, G.M. Bunkov, V.S. Semenishchev, E.V. Kirillov, I.A. Svirsky // *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. – 2017. – Vol. 312. – Iss. 2. – P. 277–283.
14. Recovery of scandium by crystallization techniques / E.M. Peters, Ş. Kaya, C. Dittrich, K. Forsberg // *Journal of Sustainable Metallurgy*. – 2019. – Vol. 5. – Iss. 1. – P. 48–56.
15. Extraction of scandium from sulfuric acid solutions with mixtures of D2EHPA + MTOA sulfate (toa) / D.O. Varlamova, P. Hein, M.A. Maung, S. Zhuo, A.V. Boyarintsev, S.I. Stepanov // *Advances in chemistry and chemical technology, USA*. – 2013. – Vol. 27. – Iss. 6 (146). – P. 7–11.
16. Chernoburova O., Chagnes A. The future of scandium recovery from wastes // *Mater. Proc.* – 2021. – Vol. 5. – № 55. DOI: <https://doi.org/10.3390/materproc2021005055>
17. Кузин Е.Н. Применение метода атомно-эмиссионной спектроскопии с СВЧ (магнитной) плазмой в процессах идентификации химического состава отходов сталеплавильного производства // *Черные металлы*. – 2022. – № 10. – С. 79–82. DOI: 10.17580/chm.2022.10.13
18. Кучумов В.А., Шумкин С.С. Анализ химического состава исходного сплава при производстве постоянных магнитов из сплавов системы Sm-Co // *Научно-технические ведомости СПбГПУ*. – 2017. – Т. 23. – № 1. – С. 219–225.
19. Нейтрализация сернокислых растворов при комплексной переработке диопсид содержащих отходов обогащения / Е.Н. Кузин, Н.Е. Кручинина, С.С. Галактионов, А.Н. Краснощеков // *Обогащение руд*. – 2019. – № 4. – С. 38–43. DOI: 10.17580/or.2019.04.07
20. Vasilenko T.A., Koltun A.A. Chemical aspects of the obtaining of iron-containing coagulant-flocculant from electric steel melting slag for wastewater treatment // *Solid State Phenomena*. – 2017. – Vol. 265. – P. 403–409.
21. Kuzin E.N., Kruchinina N.E. Titanium-containing coagulants for foundry wastewater treatment // *CIS Iron and Steel Review*. – 2020. – Vol. 20. – № 2. – P. 66–69. DOI: 10.17580/cisr.2020.02.14
22. Development and design of a closed water use cycle / J.M. Averina, G.E. Kaliakina, D.Y. Zhukov, A.Y. Kurbatov, V.S. Shumova // *19th International Multidisciplinary Scientific Geoconference (SGEM 2019)*. – Bulgaria, 2019. – Vol. 19 (3.1). – P. 145–152. DOI: 10.5593/sgem2019/3.1/S12.019
23. Towards a green industry through cleaner production development / V.H. de Mello Santos, T.L.R. Campos, M. Espuny et al. // *Environmental Science and Pollution Research (ESPR)*. – 2022. – Vol. 29. – P. 349–370. DOI: 10.1007/s11356-021-16615-2.
24. Dregulo A. Khodachek, A. Waste management reform in regions of the Russian Federation: implementation issues on the way to sustainable development // *Geography, environment, sustainability*. – 2022. – Vol. 15 (1). – P. 6–13. DOI: <https://doi.org/10.24057/2071-9388-2021-078>

Информация об авторах

Александра Дмитриевна Зайцева, аспирант кафедры промышленной экологии, Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева, Россия, 125047, г. Москва, Миусская площадь, 9, стр. 1. zaicevaaleksandra95@gmail.com

Евгений Николаевич Кузин, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры промышленной экологии, Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева, Россия, 125047, г. Москва, Миусская площадь, 9, стр. 1; Kuzin.e.n@muctr.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2579-3900>

Наталья Евгеньевна Кручинина, доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой промышленной экологии, Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева, Россия, 125047, г. Москва, Миусская площадь, 9, стр. 1; kruchinina.n.e@muctr.ru. <https://orcid.org/0000-0001-7597-1993>

Сергей Сергеевич Галактионов, научный консультант, АО «Леоли Кэпитал Групп», Россия, 121165, г. Москва, ул. Дунаевского, 4. Sergey.Galaktionov@leolicg.com; <https://orcid.org/0009-0008-9840-4586>

Александр Николаевич Краснощеков, научный консультант, АО «Леоли Кэпитал Групп», Россия, 121165, г. Москва, ул. Дунаевского, 4. a.krasnoshekov@promtech-tula.com; <https://orcid.org/0009-0000-8087-3845>

Поступила в редакцию: 24.06.2024

Поступила после рецензирования: 01.11.2024

Принята к публикации: 21.04.2025

REFERENCES

1. Julapong P., Numprasanthai A., Tangwattananukul L., Juntarasakul O., Srichonphaisarn P., Aikawa K., Park I., Ito M., Tabelin C.B., Phengsaart T. Rare earth elements recovery from primary and secondary resources using flotation: a systematic review. *Appl. Sci.*, 2023, vol. 13, no. 8364. DOI: <https://doi.org/10.3390/app13148364>
2. Sager M., Wiche O., Rare Earth Elements (REE): origins, dispersion, and environmental implications – a comprehensive review. *Environments*, 2024, vol. 11, no. 24. DOI: <https://doi.org/10.3390/environments11020024>
3. Balaran V. Potential future alternative resources for rare earth elements: opportunities and challenges. *Minerals*, 2023, vol. 13, no. 3, pp. 425.
4. Ghosh A., Dhiman S., Gupta A., Jain R. Process evaluation of scandium production and its environmental impact. *Environments*, 2023, vol. 10, no. 8. DOI: <https://doi.org/10.3390/environments10010008>
5. Zinoveev D., Grudinsky P., Zhiltsova E., Grigoreva D., Volkov A., Dyubanov V., Petelin A. Research on high-pressure hydrochloric acid leaching of scandium, aluminum and other valuable components from the non-magnetic tailings obtained from red mud after iron removal. *Metals*, 2021, vol. 11, no. 469. DOI: <https://doi.org/10.3390/met11030469>
6. Ksenofontov B.S., Kozodaev A.S., Taranov R.A., Vinogradov M.S., Voropaeva A.A., Senik E.V. Development of an integrated technology for leaching rare earth metals from ash and slag and the problem of concentrating solutions of these metals. *Modern high technology*, 2016, no. 3-1, pp. 44–49. (In Russ.)
7. Akimova I.D., Chumakova G.M., Molchanova T.V., Golovko V.V. Obtaining scandium concentrate by liquid extraction from hydrolytic sulphuric acid effluents from titanium dioxide production. *Non-ferrous metals*, 2017, vol. 3, pp. 63–68.
8. Nemtsev A.S., Sibilev A.S., Smirnov A.V., Nechaev A.V., Shestakov S.V. Features of scandium extraction from hydrolysis waste streams of titanium production. *Proceedings of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2018. Vol. 9, Iss. (2-1), pp. 332–336.
9. Li G., Ye Q., Deng B., Luo J., Rao M., Peng Z., Jiang T. Extraction of scandium from scandium-rich material derived from bauxite ore residues. *Hydrometallurgy*, 2018, vol. 176, pp. 62–68.
10. Zhang N., Li H.-X., Liu X.-M. Recovery of scandium from bauxite residue – red mud: a review. *Rare Metals*, 2016, vol. 35, Iss. 12, pp. 887–900.
11. Stepanov S.I., P'ei Kh., Boyarintsev A.V., Giganov V.G., Chekmarev A.M., Aung M.M. Use of machining to increase the recovery of scandium from refractory silicate raw material. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 2018, vol. 52, Iss. 5, pp. 973–977.
12. Rychkov V.N., Semenishchev V.S., Mashkovtsev M.A., Kirillov E.V., Kirillov S.V., Bunkov G.M., Botalov M.S. Deactivation of the scandium concentrate recovered from uranium leach liquors. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2016, vol. 310, Iss. 3, pp. 1247–1253.
13. Smirnov A.L., Titova S.M., Rychkov V.N., Bunkov G.M., Semenishchev V.S., Kirillov E.V., Svirsky I.A. Study of scandium and thorium sorption from uranium leach liquors. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2017, vol. 312, Iss. 2, pp. 277–283.
14. Peters E.M., Kaya Ş., Dittrich C., Forsberg K. Recovery of scandium by crystallization techniques. *Journal of Sustainable Metallurgy*, 2019, vol. 5, Iss. 1, pp. 48–56.
15. Varlamova D.O., Hein P., Maung M.A., Zhuo S., Boyarintsev A.V., Stepanov S.I. Extraction of scandium from sulfuric acid solutions with mixtures of D2EHPA +MTOA sulfate (toa). *Advances in chemistry and chemical technology*, USA, 2013, vol. 27, Iss. 6 (146), pp. 7–11.
16. Chernoburova O., Chagnes A. The future of scandium recovery from wastes. *Mater. Proc.*, 2021, vol. 5, no. 55. DOI: <https://doi.org/10.3390/materproc2021005055>
17. Kuzin E.N. Application of the method of atomic emission spectroscopy with microwave (magnetic) plasma in the processes of identifying the chemical composition of steelmaking waste. *Black metals*, 2022, no. 10. pp. 79–82. (In Russ.) DOI: 10.17580/chm.2022.10.13
18. Kuchumov V.A., Shumkin S.S. Analysis of the chemical composition of the initial alloy in the production of permanent magnets from alloys of the Sm-Co system. *Scientific and Technical Journal of St. Petersburg State Polytechnic University*, 2017, vol. 23, no. 1, pp. 219–225. (In Russ.)
19. Kuzin E.N., Kruchinina N.E., Galaktionov S.S., Krasnoshchekov A.N. Neutralization of sulfuric acid solutions during complex processing of diopside-containing enrichment waste. *Ore Enrichment*, 2019, no. 4, pp. 38–43. (In Russ.) DOI: 10.17580/or.2019.04.07
20. Vasilenko T.A., Koltun A.A. Chemical aspects of the obtaining of iron-containing coagulant-flocculant from electric steel melting slag for wastewater treatment. *Solid State Phenomena*, 2017, vol. 265, pp. 403–409.
21. Kuzin E.N., Kruchinina N.E. Titanium-containing coagulants for foundry wastewater treatment. *CIS Iron and Steel Review*, 2020, vol. 20, no. 2, pp. 66–69 DOI: 10.17580/cisr.2020.02.14
22. Averina J.M., Kaliakina G.E., Zhukov D.Y., Kurbatov A.Y., Shumova V.S. Development and design of a closed water use cycle. *19th International Multidisciplinary Scientific Geoconference (SGEM 2019)*. Bulgaria, 2019. Vol. 19 (3.1.), pp. 145–152. DOI: 10.5593/sgem2019/3.1/S12.019
23. De Mello Santos V.H., Campos T.L.R., Espuny M. Towards a green industry through cleaner production development. *Environmental Science and Pollution Research (ESPR)*, 2022, vol. 29, pp. 349–370. DOI: 10.1007/s11356-021-16615-2.
24. Dregulo A., Khodachek A. Waste management reform in regions of the Russian Federation: implementation issues on the way to sustainable development. *Geography, environment, sustainability*, 2022, vol. 15 (1), pp. 6–13. DOI: <https://doi.org/10.24057/2071-9388-2021-078>

Information about the authors

Alexandra D. Zaitseva, Postgraduate Student, D.I. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, 9, bld. 1, Miusskaya square, Moscow, 125047, Russian Federation. zaicevaaleksandra95@gmail.com

Evgenii N. Kuzin, Cand. Sc., Associate Professor, D.I. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, 9, bld. 1, Miusskaya square, Moscow, 125047, Russian Federation; Kuzin.e.n@muctr.ru. <https://orcid.org/0000-0003-2579-3900>

Natalia E. Kruchinina, Dr. Sc., Professor, Head of the Industrial Ecology Department, D.I. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, 9, bld. 1, Miusskaya square, Moscow, 125047, Russian Federation. kruchinina.n.e@muctr.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7597-1993>

Sergey S. Galaktionov, Scientific Consultant, LTD "Leoli Capital Group", 4, Dunaevsky street, Moscow, 121165, Russian Federation. Sergey.Galaktionov@leolicg.com; <https://orcid.org/0009-0008-9840-4586>

Alexander N. Krasnoshchekov, Scientific Consultant, LTD "Leoli Capital Group", 4, Dunaevsky street, Moscow, 121165, Russian Federation. a.krasnoshekov@promtech-tula.com; <https://orcid.org/0009-0008-9840-4586>

Received: 24.06.2024

Revised: 01.11.2024

Accepted: 21.04.2025

УДК 622.276 (678.745.842)
DOI: 10.18799/24131830/2025/7/4710
Шифр специальности ВАК: 2.8.4
Обзорная статья

Обзор сшитых полимерных композиций для повышения нефтеотдачи пластов

Д.Г. Подопригора, Ф.Д. Маркушина✉

Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Россия, г. Санкт-Петербург

✉s233002@stud.spmi.ru

Аннотация. Актуальность. Из практики мировой нефтедобычи известно, что разработка месторождений нефти сопровождается уменьшением отбора нефти и увеличением обводненности продукции добывающих скважин. При этом на участке от нагнетательной скважины до реагирующих добывающих скважин в залежах с неоднородными породами-коллекторами может оставаться значительная нефтенасыщенная часть и нефтенасыщенные интервалы, не охваченные воздействием. Перспективным вариантом увеличения охвата продуктивных горизонтов воздействием, повышения коэффициента охвата и итоговой нефтеотдачи является применение потокоотклоняющих технологий. **Цель.** Обзор, оценка эффективности и перспектив использования сшитых полимерных композиций для повышения нефтеотдачи. **Методы.** Анализ существующих исследований и сравнительный анализ характеристик различных сшитых полимерных композиций, применяемых в нефтедобыче. **Результаты и выводы.** Проведён обзор по применению сшитых полимерных композиций для повышения нефтеотдачи. Делается вывод, что полимеры могут быть двух типов: синтетические полимеры и биополимеры. Один из самых распространённых синтетических полимеров – частично гидролизированный полиакриламид, а наиболее широко используемым биополимером является ксантановая камедь. Также было рассмотрено применение сшитых полимерных систем в промысловых условиях, основные принципы, механизмы действия и критерии применимости, учитывая основные геолого-физические условия пластов. Системы сшитых полимер классифицируются на три вида: коллоидно-дисперсные гели, предварительно сшитые гранулированные гели и полимеры внутрипластового гелирования. Отмечаются различные типы сшивателей полимеров, применяемые в каждом виде системы. На основании данного обзора исследователю можно будет определиться с выбором реагента для приготовления сшитых полимерных композиций, учитывая специфические требования и условия конкретного месторождения для оптимального подбора реагента.

Ключевые слова: повышение нефтеотдачи, обводненность, полимерные гели, предварительно сшитые гели, коллоидно-дисперсные гели

Для цитирования: Подопригора Д.Г., Маркушина Ф.Д. Обзор сшитых полимерных композиций для повышения нефтеотдачи пластов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 7. – С. 78–96. DOI: 10.18799/24131830/2025/7/4710

UDC 622.276 (678.745.842)
DOI: 10.18799/24131830/2025/7/4710
Review article

Overview of crosslinked polymer compositions for enhanced oil recovery

D.G. Podoprigora, F.D. Markushina✉

Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation

✉s233002@stud.spmi.ru

Abstract. Relevance. It is known from the practice of world oil production that the development of oil fields is accompanied by a decrease in oil withdrawal and an increase in water cut of production wells. In the section from the injection well to the reacting production wells, there may still be significant oil saturated and unaffected oil saturated intervals in reservoirs with

heterogeneous reservoir rocks. The application of flow-removal technologies is a promising option for increasing the coverage of productive horizons, increasing the coverage factor and final oil recovery. **Aim.** To review, evaluate the effectiveness and prospects of crosslinked polymer compositions for enhanced oil recovery. **Methods.** Analysis of existing studies and comparative analysis of the performance of various crosslinked polymer composites used in petroleum applications. **Results and conclusions.** The authors have carried out a review on the application of crosslinked polymer compositions for enhanced oil recovery. The paper concludes that polymers can be of two types: synthetic polymers and biopolymers. One of the most common synthetic polymers is partially hydrolyzed polyacrylamide, and the most generally used biopolymer is xanthan gum. The text also discussed the application of crosslinked polymer systems in field conditions, basic principles, mechanisms of action and applicability criteria, taking into account the main geological and physical conditions of reservoirs. Crosslinked polymer systems are classified into three types: colloidal dispersed gels, pre-crosslinked granular gels, and in-situ gelation polymers. The different types of polymers crosslinkers used in each type of system are noted. Based on this review it is possible for the researcher to determine the choice of reagent for the preparation of crosslinked polymer compositions taking into account the specific requirements and conditions of a particular field for optimal selection of the reagent.

Keywords: enhanced oil recovery, water cut, polymer gels, preformed particle gel, colloidal dispersed gels

For citation: Podoprighora D.G., Markushina F.D. Overview of crosslinked polymer compositions for enhanced oil recovery. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 7, pp. 78–96. DOI: 10.18799/24131830/2025/7/4710

Введение

В настоящее время за счет применения заводнения обеспечивается 50 % всей добычи нефти на месторождениях мира [1]. Высокая обводненность продукции является одной из основных проблем в нефтяной индустрии [2].

Средняя обводненность добываемой продукции по Российской Федерации (РФ) составляет более 86 % [3]. Одним из ключевых регионов добычи нефти в России является Западная Сибирь, где добывается 55 % от общегодовой добычи страны. Большая часть крупных и уникальных месторождений Ханты-Мансийского автономного округа, где сосредоточено 67 % запасов нефти Западной Сибири, обладают уровнем отбора от начальных извлекаемых запасов от 65 до 85 %. Средний показатель содержания воды в добываемой продукции с этих месторождений составляет от 72 до 92 %. Примером некоторых месторождений с обводненностью добываемой продукции более 90 %, полностью оснащенных для осуществления добычи нефти и обладающих длительной историей разработки, являются: Самотлорское, Приобское и Лянторское [4].

Снижение обводнённости добываемой продукции является актуальной задачей для нефтяной промышленности. Также существует острая необходимость увеличения добычи нефти на месторождениях по всему миру, учитывая, что средний коэффициент нефтеотдачи – 30 % [5, 6].

В связи с высокой обводненностью добываемой продукции на большом количестве месторождений России с целью увеличения коэффициента извлечения нефти в последние годы были разработаны многочисленные потокоотклоняющие технологии. В потокоотклоняющих технологиях могут использоваться следующие составы: сшитые полимерные составы [7], составы на основе силикатных систем, термотропные композиции и другие [8–10].

Гелеобразующий агент закачивается в нагнетательную скважину для частичной блокировки промытых интервалов с высокой проницаемостью с целью увеличения охвата пласта вытеснением и увеличения итоговой нефтеотдачи. Механизм представлен на рис. 1.

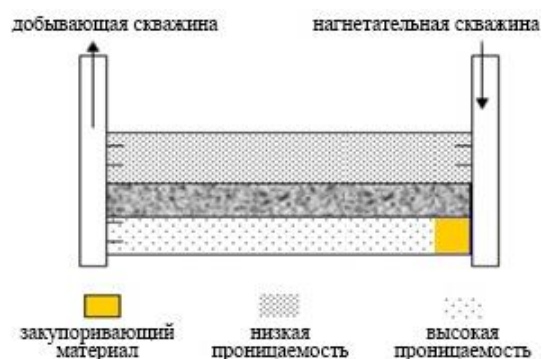


Рис. 1. Водоизоляция и выравнивание профиля приемистости [11]

Fig. 1. Water isolation and injectivity profile equalization [11]

Выбор и применение потокоотклоняющих технологий зависит от геолого-физических условий конкретного месторождения, свойств пласта и параметров работы скважины [12].

В табл. 1 можно ознакомиться с критериями применимости водоизоляционных гелеобразующих составов, которые способны эффективно снизить обводненность и повысить коэффициент извлечения нефти.

Далее в данном обзоре рассматриваются реагенты, используемые при приготовлении сшитых полимерных систем, известные рецептуры полимерных составов и опыт успешного применения.

Таблица 1. Критерии применимости технологии для ограничения водопотока с учетом основных геолого-физических характеристик [13, 14]

Table 1. Criteria of applicability of technology for water flow limitation taking into account main geological and physical characteristics [13, 14]

Критерии применимости технологии Criteria of technology applicability	Сшитые полимерные составы Crosslinked polymer compositions	Составы на основе силикатных систем Compositions based on silicate systems	Термотропные гелеобразующие композиции Thermotropic gel compositions
Тип коллектора Reservoir type	Терригенные, карбонатные Terrigenous, carbonate	Терригенные, карбонатные Terrigenous, carbonate	Терригенные Terrigenous
Температура Temperature, °C	25–150	<200	>70
Проницаемость, мкм ² Permeability, mkm ²	0,03–5	0,08–0,5	0,02–10
Обводненность скважин, % Average water cut, %	40–99	>80	40–95
Приемистость нагнетательных скважин, м ³ /сут Injection capacity of injection wells, m ³ /day	150–1000	<500	100–300
Эффективное применение на месторождениях Effective field application	Китай, США, Россия China, USA, Russia	Республика Казахстана, Россия Republic of Kazakhstan, Russia	Россия Russia

Сшитые полимерные составы

Сшитые полимерные гели представляют собой трехмерные структуры, где цепи полимеров соединены ионными или ковалентными полярными связями [15].

Так, к концу 1980-х гг. было исследовано большое количество полимерных составов двух основных типов: синтетические полимеры и биополимеры. К синтетическим полимерам, используемым наиболее часто в области нефтегазодобычи, обычно относят частично гидролизованный полиакриламид (partially hydrolyzed polyacrylamide – HPAM), сополимеры полиакриламида, а также искусственные полимеры на основе природных полисахаридов.

К биополимерам относят ксантан (ксантановая камедь), гуар (гуаровая камедь) и природные полисахариды (целлюлоза, склероглюкан). Среди них наибольшее распространение в области нефтегазодобычи получила ксантановая камедь, продемонстрировавшая лучшие характеристики стабильности и загущающую способность. Структурная формула представлена на рис. 2.

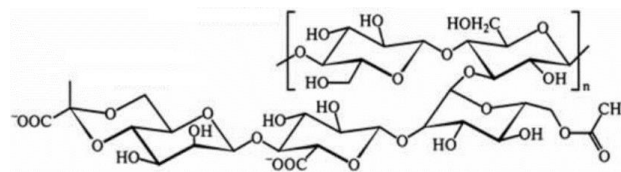


Рис. 2. Структурная формула ксантановой камеди [16]
Fig. 2. Structural formula of xanthan gum [16]

На сегодняшний день для нефтяных месторождений разработано множество гелевых систем. Наиболее широко в потокоотклоняющих технологиях используются составы на основе полиакриламида (polyacrylamide – PAM) [17]. С целью расширения области использования полиакриламида на сегодняшний день применяется НРАМ с различной степенью гидролиза (degree of hydrolysis – DH) и молекулярной массой (molecular weight – MW) [18]. Также к синтетическим полимерам относятся полиакрилонитрил, поливиниловый спирт и поливиниламин. Их структура отмечена на рис. 3.

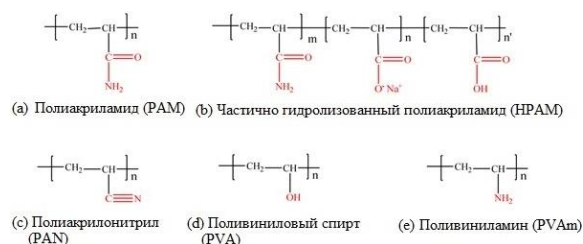


Рис. 3. Химическая структура различных синтетических полимеров [19]
Fig. 3. Chemical structure of various synthetic polymers [19]

Всё разнообразие полимерных сшитых составов, в зависимости от закладываемого в них механизма формирования геля, можно классифицировать на следующие основные категории: составы внутрипластового гелирования, коллоидно-дисперсные гели (colloidal dispersion gels – CDG) и предварительно сшитые гранулированные гели [20]. Эти составы в свою очередь можно объединить в одну классификацию, представленную на рис. 4.

В табл. 2 представлено сравнение сшитых полимерных составов, где описываются плюсы и минусы каждого состава.

Составы внутрипластового гелирования (полимерные гели)

В данную группу входят растворы мономеров, полимеризующихся в поровом пространстве пласта в присутствии катализатора или же без него (первые предложенные компанией Halliburton в 1978 г.), а также растворы полимеров, формирующие гели внутри поровой структуры в процессе сшивания при

наличии специфических добавок. Компоненты данных растворов подаются в пласт в виде подготовленного на поверхности водного раствора, называемого гелантом, вязкость которого в ходе закачки близка к вязкости воды, что обеспечивает проникновение смеси в промытые водой области продуктивного пласта. Химический состав геланта подбирается таким образом, чтобы процесс сшивания достигал максимальной интенсивности уже после проникно-

вения раствора в обрабатываемые области пласта. Характеристики процесса сшивания полимерного геля и, как следствие, конечный результат обработки (распределение геля в залежи, механические и реологические свойства геля и т. д.) сильно зависят от пластовых условий и параметров закачки: температуры, минерализации пластовой воды, pH, действующих перепадов давления и скорости фильтрации (сдвиговые деформации) [20].

Таблица 2. Сравнение сшитых полимерных составов [15, 21]

Table 2. Comparison of crosslinked polymer compositions [15, 21]

Параметр Parameter	Описание Characterization	Плюсы Advantages	Минусы Disadvantages
Составы внутрипластового гелирования (полимерные гели) In-situ gelation compositions (polymer gels)	- В пласт закачивается раствор, в состав которого входит определенная концентрация полимера, сшивающего агента и функциональных реагентов-присадок (добавок) A solution containing certain concentration of polymer, crosslinking agent and functional additive reagents (additives) is injected into the reservoir; - Сшивающий агент соединяется с соседними молекулами полимера путем химического или физического взаимодействия для создания трехмерных структур (3D) в пластовых условиях The crosslinking agent combines with neighboring polymer molecules by chemical or physical interaction to create three-dimensional structures (3D) under reservoir conditions; - Гели образуются в пластовых условиях Gels are formed under reservoir conditions; - Характеристики внутрипластовых полимерных гелей в значительной степени зависят от типа и качества используемого полимера The characteristics of in-situ polymer gels depend largely on the type and quality of the polymer used	- Сохраняется высокая приемистость в процессе закачки геля High injectivity is maintained during gel injection; - Полимерный состав может легко фильтроваться через пласт и проникать вглубь пласта The polymer composition can be easily filtered through the formation and penetrate deep into the formation	- Сложность в контроле прочностных характеристиках гелевой системы Difficulty in controlling the strength characteristics of the gel system; - Полимеры разных типов и модификаций обладают неодинаковой устойчивостью к солевому и температурному воздействию Different types and modifications of polymers react differently to salt and temperature effects
Коллоидно-дисперсные гели (CDG) Colloidal dispersed gels (CDG)	- Готовятся из более низких по сравнению с внутрипластовыми полимерными гелями концентраций полимера Prepared from lower polymer concentrations than in-situ polymer gels; - Дисперсный коллоидный гель, образуемый в пласте Dispersed colloidal gel formed in a formation; - Характеристики коллоидных дисперсионных гелей в значительной степени зависят от типа и качества используемого полимера Characteristics of colloidal dispersion gels depend largely on the type and quality of the polymer used	Высокая приемистость благодаря относительно низкой концентрации полимера High injectivity due to relatively low polymer concentration	- Готовится только из пресной воды Prepared from fresh water only; - Дисперсный гель непрочный Dispersed gel is fragile; - Полимеры разных типов и модификаций обладают неодинаковой устойчивостью к солевому и температурному воздействию Different types and modifications of polymers react differently to salt and temperature effects
Предварительно сшитые гранулированные гели (PPG) Preformed particle gels (PPG)	- Полимерные частицы определенного размера, распределенные в дисперсионной среде, которые образуют при этом суспензию Polymer particles of a certain size distributed in a dispersion medium, forming a suspension; - Гели полностью формируются перед закачкой Gels are fully formed before injection; - На гелеобразование не влияют условия пласта Gel formation is not affected by reservoir conditions; - Характеристики предварительно сшитых гранулированных гелей в значительной степени зависят от типа и качества используемого полимера Characteristics of pre-crosslinked granular gels depend largely on the type and quality of the polymer used	- Позволяют закупоривать каналы с высокой проницаемостью Allow plugging channels with high permeability; - Есть возможность контролировать прочность и размер частиц при приготовлении It is possible to control the strength and particle size during preparation; - Может готовиться из пластовой воды и набухает в воде Can be prepared from formation water and swells in water; - На гелеобразование не влияют условия пласта Gel formation is not affected by reservoir conditions	- Размер частиц относительно большой Particle size is relatively large; - Может использоваться только для высоко неоднородных коллекторов Can only be used for highly heterogeneous reservoirs

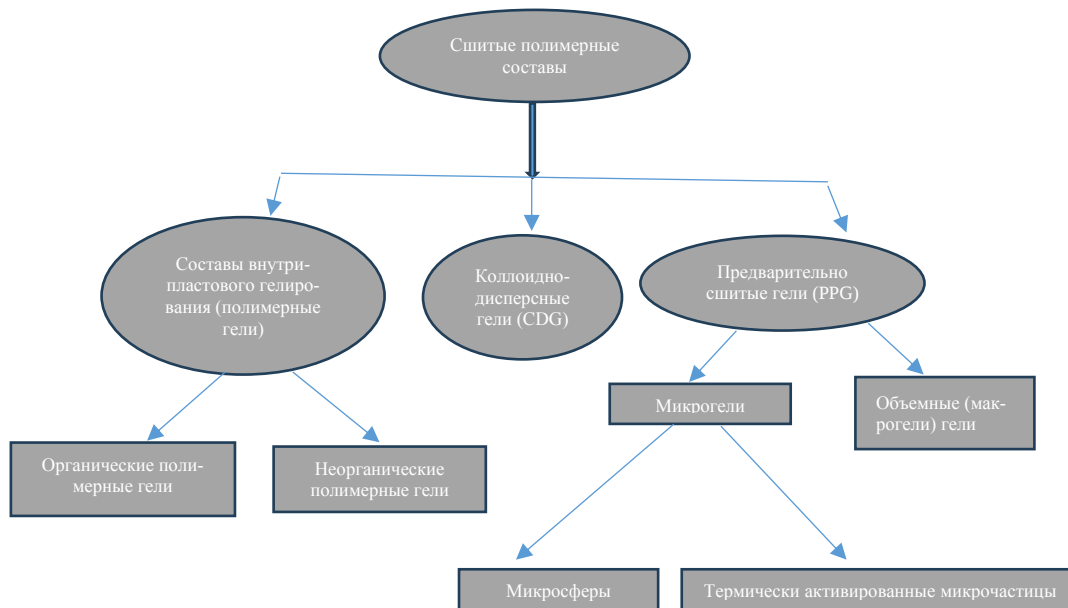


Рис. 4. Классификация сшитых полимерных составов
Fig. 4. Classification of crosslinked polymer compositions

Полимерные гели состоят в основном из двух компонентов: полимера и сшивающего агента. Типы сшивателей можно разделить на две категории: металлические (неорганические) и органические.

В качестве сшивателя органической природы выступают фенол-формальдегид [22], где сшивка полимеров происходит только при температуре выше 70–80 °С и требует щелочную среду; резорцинол-гексаметиленetetрамин для пластов с низкой температурой и высоким уровнем минерализации пластовой воды [23]; фенольные соединения (фенол, катехол, резорцинол и гидрохинон), которые успешно преодолели испытания при температуре 150 °С [24].

В 2000 г. Чжуан и др. [25] исследовали время образования геля и сообщили, что гелевые системы с органическими сшивающими агентами чрезвычайно чувствительны к солености, влияющей на время гелеобразования, и образование геля не происходит ниже pH 7,5. Для решения проблемы чувствительности к солености и pH была разработана новая гелевая система под названием сульфометилированный резорцинол-формальдегид. Ученые успешно разработали этот гель с увеличенным временем гелеобразования и для низкого pH около 5,0.

Хатчинс и др. в работе [26] описали использование систем с органическими сшивающими агентами, которые могут работать при повышенных температурах. Гель содержал НРАМ и сшивающий агент, состоящий из комбинации гидрохинона (hydroquinone – HQ) и гексаметилентетрамина (hexamethylenetetramine – HMTA). Структурные формулы гидрохинона и гексаметилентетрамина представлены на рис. 5.



Рис. 5. Структура гидрохинона и гексаметилентетрамина [26]

Fig. 5. Structure of hydroquinone and hexamethylenetetramine [26]

НМТА – это продукт, который может продлевать время гелеобразования. Характеристики этой гелевой системы показывают, что она стабильна в течение 12 месяцев при 149 °С и 5 месяцев при 176,7 °С, при этом она формируется быстро – в течение 1 дня. Хатчинс и др. также использовали несколько новых сшивающих агентов в дополнение к НМТА, включая терефталевую кислоту, глутаровую кислоту, НМТА и терефталальдегид в качестве первичных сшивающих агентов и дигидрокси-нафталин, HQ и галовую кислоту в качестве вторичных сшивающих агентов.

В работе [27] авторы исследовали гели, образованные с помощью полимеров на основе акриламида с полиэтиленгликолем и бентонитом. Они изучали влияние полимерной структуры на прочность геля и кинетику гелеобразования. В качестве полимеров использовались РАМ; НРАМ; сополимер акриламида и 2-акриламид-2-метилпропансульфоновой кислоты (acrylamide and 2-acrylamide-2-methylpropane sulfonic acid copolymer - РАМ-АМПС) и акриламид, 2-акриламидо-2-метилпропансульфоновая кислота, N-винил-2-

пирролидон (acrylamide, 2-acrylamido-2-methylpropane sulfonic acid, and N-vinyl-2-pyrrolidone - PAM-AMPS-NVP). Было замечено, что большее количество AMPS/акрилатных групп и большая молярная масса приводят к сокращению времени гелеобразования и большей прочности геля. Гели, сформированные с использованием групп NVP или тертого бентонита, имели большее время гелеобразования и лучшую прочность геля. Авторы также утверждают, что лучшая прочность геля была получена при использовании полимеров PAM-AMPS-NVP.

В Мексике успешно применялась система органически сшитых полимеров, основанная на сополимере акриламида, т-бутилакрилата и полиэтиленimina. На сегодняшний день в Мексике с помощью этой системы было выполнено более 100 работ по решению таких проблем, как образование водяных конусов, высокопроницаемых зон. Эта система может проникать глубоко в пласт, обеспечивая более эффективное перекрытие воды. Базовый полимер системы представляет собой сополимер акриламида и т-бутилакрилата, высокоактивную жидкость с повышенной термостабильностью. В качестве сшивателя используется полиэтиленimin – высокоактивная жидкость, образующая прочные ковалентные связи с базовым полимером. Температурный диапазон системы составляет от 27 до 177 °C. Система успешно используется в промышленных условиях при температуре до 127 °C [28, 29].

Несмотря на успешное применение органических гелей, существует несколько ограничений в механизмах сшивки, на которые влияет сшивание во время закачки геля в пористую среду (низкий индукционный период гелеобразования и различные варианты деструкции) [30, 31].

Неорганические сшивающие агенты включают в себя в основном ионы различных многовалентных металлов, таких как хром (Cr(III)), алюминий (Al(III)), цирконий (Zr(IV)), железо (Fe(III)). Реакция сшивания НРАМ и Al^{3+} или Cr^{3+} происходит между отрицательно заряженными карбоксилатными группами НРАМ и гидратированным Al^{3+} [32, 33].

По сравнению с другими типами сшивателей [34], полученные хромовые гели имеют более широкое применение в различных пластовых условиях [35]. Эти полимерные гели, разработанные на основе неорганических (металлических) сшивателей, получили широкое распространение на нефтяных месторождениях благодаря более низкой стоимости [36–38].

Хром может встречаться как в органических, так и в неорганических соединениях, в зависимости от его химической формы и связей.

Хромовый сшивающий агент, по существу, представляет собой комплекс Cr(III)-лигандов.

Обычно используемые лиганды включают уксусную кислоту, пропионовую кислоту, малонат, лимонную кислоту, молочную кислоту и т. д. Органический хромовый сшивающий агент характеризуется более низкой токсичностью для человека, меньшим экологическим загрязнением и обладает улучшенной термохимической стабильностью.

Общепринятым механизмом образования органических сшивающих агентов хрома является теория лигандного обмена, предложенная Локхартом в 1994 г. [39]. Согласно этой теории, процесс гелеобразования заключается, по существу, в обмене между лигандами, образующими комплекс с Cr(III), и карбоксильными группами полимера (COO-).

Комплексообразование различных лигандов с Cr(III) – очень простой и эффективный способ продлить время гелеобразования. Однако в пластах при высокой температуре – более 120 °C, какой бы лиганд ни использовался, скорость его диссоциации от Cr(III) высокая [21].

В 1990 г. Сиданск запатентовал полимерно-гелевую систему с использованием НРАМ/Cr(III) ацетата [38]. Ацетатная группа имеет структуру, очень похожую на карбоксилатные группы полимера НРАМ. Поэтому ионы Cr(III) находятся под притяжением как ацетатного лиганда в комплексе, так и карбоксилатных групп на НРАМ. На рис. 6 показан механизм процесса сшивания сшивающего агента из ацетата хрома с полимером.

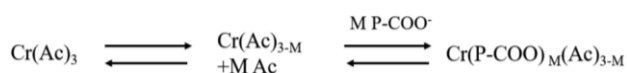


Рис. 6. Сшивка ацетата хрома и полимера [37]

Fig. 6. Chromium acetate and polymer crosslinking [37]

Содержание карбоксильных групп в смешанном растворе полимера и сшивателя ацетата хрома увеличивается с ростом концентрации полимера, что способствует конкуренции карбоксилатной группы на полимере и ацетатной группы на ацетате хрома за Cr(III). Прочность геля и время гелеобразования контролируются, и система может применяться в высокотемпературных резервуарах с 124 °C и выше. Высокомолекулярные полиакриламиды, в диапазоне от 5 до 20 миллионов MW, вводятся в концентрации от 3000 до 8500 ppm для глубокого размещения. Низкомолекулярные полиакриламиды, менее 500 MW, закачиваются в концентрациях от 30000 до 60000 ppm.

Янг и др. [40] разработали гели с использованием амфифильных полимеров с Cr(III) в качестве сшивателя (рис. 6), которые были использованы для перекрытия высокопроницаемых каналов с лучшей вяз-

ко-упругостью в пластах с высокой минерализацией (NaCl 80 г/л). Был использован гель с полимером 3 г/л и сшивателем 0,3 мас. %, который обеспечивает прочность геля при времени гелеобразования 4 ч с 93 % стабильностью объема геля до 60 дней. Несмотря на широкое применение и эффективности при повышении нефтеотдачи, данный реагент обладает рядом ограничений, в том числе склонностью к образованию предгелевых структур до формирования стабильной трехмерной гелевой системы.

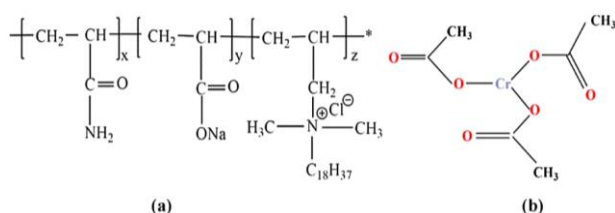


Рис. 7. Химическая структура (а) амфифильного полимера и (б) органического хрома [39]

Fig. 7. Chemical structure of (a) amphiphilic polymer and (b) organic chromium [40]

В 1988 г. Мумалла [41] изучил структуру образовавшегося комплекса с мольным соотношением 2:1 Al^{3+} и цитрата, которая показана на рис. 8. Два атома алюминия были соединены двумя гидроксильными группами. Для одного из Al три координационных пространства были заняты цитратом, а последнее – водой.

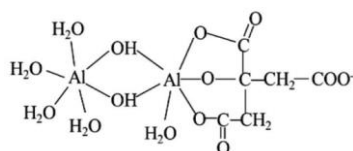


Рис. 8. Мольное соотношение 2:1 Al^{3+} и цитрата [42]

Fig. 8. Molar ratio of 2:1 of Al^{3+} and citrate [42]

Регулирование времени реакции сшивания достигается путём изменения состава цитрата алюминия, что обусловлено простотой и практичностью контроля данного параметра. В лабораторном эксперименте [42] представлено изучение существующих форм Al^{3+} в трех растворах цитрата алюминия при разной степени минерализации. Это позволило оценить влияние данного параметра на процесс сшивания НРАМ/ Al^{3+} . Установлено, что механизм реакции сшивания во всех трёх типах растворов остаётся одинаковым. Цитрат алюминия 1 – система с мольным соотношением цитрата и Al^{3+} 1:2. Цитрат алюминия 2 – система с мольным соотношением цитрата и Al^{3+} 1:1. Цитрат алюми-

ния 3 – система с мольным соотношением цитрата и Al^{3+} 2:1. При температуре 60 °С цитрат алюминия первого раствора подходит для диапазона минерализации 0–25 г/л, цитрат алюминия второго раствора – для диапазона минерализации 5–35 г/л, а цитрат алюминия третьего состава – для диапазона минерализации 20–50 г/л.

В работе [43] был создан эффективный полимерный гель, в котором использовался частично гидролизованный полиакриламидный полимер и сшивающие агенты $\text{CH}_4\text{N}_2\text{S}$ (тиоцианат аммония)/дихромат калия ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$). Раствор гелеобразователя состоял из $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ (дихромата калия), $\text{CH}_4\text{N}_2\text{S}$ (тиоцианат аммония), NaCl (хлорид натрия), где оптимальными условиями считались следующие: концентрация полимера – 8000 ppm; концентрация NaCl – 15000 ppm; $\text{CH}_4\text{N}_2\text{S}$ – 5000 ppm и $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ – 5000 ppm. Этот состав применяется для пластов высокой температуры – 80 °С и более. В табл. 3 представлено обобщение применения составов внутрипластового гелирования.

Коллоидно-дисперсные гели

Коллоидные дисперсионные гели используются для глубокой изоляции высокопроницаемых пород в нефтяных пластах. В состав закачиваемых гелей входят сшивающие агенты и низкие концентрации (ниже 1200 ppm) полимера, что позволяет получить медленно образующийся полужидкий гель. Поскольку гель образуется медленно, его можно закачивать глубоко в пласт [44].

При приготовлении CDG чаще всего используется частично гидролизованный полиакриламид. Время гелеобразования регулируется и может составлять от нескольких часов до нескольких недель. Скорость гелеобразования (сшивания) зависит от концентрации полимера, соотношения полимер: сшивающий агент, минерализации воды и температуры [45].

Для применения в промышленных условиях время гелеобразования должно составлять от нескольких часов до нескольких недель, чтобы оно происходило на значительном расстоянии от забоя скважины.

В качестве сшивателя обычно используется ион трехвалентного металла, чаще всего цитрат алюминия [46–48].

На месторождениях с минерализацией пластовой воды выше 5 г/л применение этих гелей невозможно. Установлен предельный уровень минерализации – 5 г/л, а также максимальная пластовая температура применения – до 90 °С [49]. Однако в отдельных случаях сообщалось об успешном применении при температуре до 94,4 °С [45, 47].

Некоторые параметры, которые необходимо учитывать при обработке для CDG, представлены в табл. 4.

Таблица 3. Обобщённые результаты практического и эффективного применения составов внутрипластового гелирования

Table 3. Generalized results of practical and effective application of in-situ gelation compositions

Краткое описание состава композиции Summary of the composition	Применение Application	Полученные результаты Results obtained	Год Year
Состав состоял из полиакриламида, гидрохинона и гексаметилентетрамина [26] Composition consisted of polyacrylamide, hydroquinone and hexamethylenetetramine	Применение в промышленных условиях Field application	Обводненность снизилась на 60 % Water cut reduced by 60%	1996
Состав, содержащий формальдегид, сульфит натрия и резорцинол [25] Composition containing formaldehyde, sodium sulfite and resorcinol [25]	Лабораторное исследование Laboratory investigation	Прочные и стабильные гели при температуре от 25 до 52°C в диапазоне pH от 5 до 8,0 Strong and stable gels at 25–52°C in the pH range of 5 to 8.0	2000
Состав состоял из акриламида, т-бутилакрилата и полиэтиленimina [29] Composition consisted of acrylamide, t-butyl acrylate and polyethylenimine [29]	Применение в промышленных условиях Field application	Постоянная обводненность на уровне 11 % Constant water cut at the level of 11%	2009
Состав на основе полиакриламида и метилпропансульфоновой кислоты [27] Composition based on polyacrylamide and methylpropanesulfonic acid [27]	Лабораторное исследование Laboratory investigation	Образование геля с длительной устойчивостью (3–6 месяцев) при температуре 90 °C Gel formation with long-term stability (3–6 months) at 90°C	2019
Состав на основе хрома и амфифильных полимеров [40] Composition based on chromium and amphiphilic polymers [40]		Прочность геля формируется при времени гелеобразования 4 часа, при этом его стабильность сохраняется до 60 дней Gel strength is formed at a gel time of 4 h with gel stability up to 60 days	2019
Состав на основе полиакриламида и алюминия [42] Polyacrylamide and aluminum-based composition [42]		Система применяется в диапазоне солености 5–35 и 20–50 г/л при температуре 60 °C System is used in the salinity range of 5–35 and 20–50 g/l at 60°C	2019
Композиция состояла из полиакриламида, тиоцианата аммония и дихромата калия [43] Composition consisted of polyacrylamide, ammonium thiocyanate and potassium dichromate [43]		Установлено применение состава для пластов с температурой 80 °C и выше Application of the composition for reservoirs with temperature of 80°C and above is established	2022

Таблица 4. Параметры при обработке для CDG [50, 51]

Table 4. Parameters during processing for CDG [50, 51]

Концентрация при обработке Concentration during treatment, ppm	250–1200
Соотношение полимер:сшивающий реагент Polymer:crosslinking agent ratio	20:1–80:1
Максимальное давление закачки, атм Maximum injection pressure, atm	50–150
Объем закачки, м³/скв/Injection volume, m³/well	1600–104000

В статье [50] описаны другие ключевые аспекты внедрения метода закачки коллоидного геля на нефтяных скважинах.

В промысловых условиях применение CDG может обеспечить значительные экономические преимущества, поскольку требуются низкие концентрации химических веществ.

Эффективность применения этих гелей реализовалась на месторождениях в Китае, США, Аргентине и Колумбии [52, 53].

Было проведено пилотное испытание [46], которое было признано успешным. Сообщалось о снижении обводненности на 19,8 % и увеличении нефтеотдачи на 10,5 %. Система CDG состояла из частично НРАМ с MW в диапазоне от 8 до 17 миллионов дальтонов и цитрат алюминия для сшивания. Затраты на химикаты составили 2,72 доллара за баррель дополнительной нефти. Сообщалось об успешном использовании

CDG в 22 из 29 промышленных проектов, реализованных в регионе Скалистых гор в США.

В Вьетнаме, несмотря на значительную добычу нефти, освоение технологии нефтепереработки остается недостаточным [54].

Стоит отметить, что недостатки коллоидных дисперсных гелей также включают разрушение структуры частиц при механическом воздействии, таком как действие насосных агрегатов и высокая скорость закачки, а также при взаимодействии с ионами пластовой воды. Также отмечается, что гелевая система CDG очень чувствительна к pH и температуре, поэтому её нельзя закачивать глубоко в пласты с жесткими термобарическими условиями. В табл. 5 представлено обобщение применения коллоидно-дисперсных гелей.

Предварительно шитые гели

Гель из предварительно сформированных частей, также называемый PPG, состоит из шитых частиц полиакриламида. В присутствии воды гелевые частицы способны набухать, увеличиваясь в объёме в сотни раз по сравнению со своим первоначальным размером, что обусловлено наличием гидрофильных групп в их структуре (–COOH и –CONH₂) [56, 57]. Согласно иллюстрации на рис. 9, высушенные частицы PPG (a) после контакта с водой набухают до состояния (b), поэтому PPG является одним из видов суперабсорбирующих полимеров [57].

Таблица 5. Обобщённые результаты практического и эффективного применения коллоидно-дисперсных гелей

Table 5. Summarized results of practical and effective application of colloidal dispersed gels

Краткое описание состава композиции Summary of the composition	Применение Application	Полученные результаты Results obtained	Год Year
Состав на основе полиакриламида и цитрата алюминия [55] Composition based on polyacrylamide and aluminum citrate [55]	Лабораторное исследование Laboratory investigation	Вязкость растворов полимеров уменьшалась с течением времени в течение 3 недель; растворы приготовлены при концентрации полимера 300 ppm Viscosity of the polymer solutions decreased with time over a period of three weeks; solutions were prepared at a polymer concentration of 300 ppm	1998
Состав на основе полимера с цитратом алюминия [45] Polymer-based composition with aluminum citrate [45]	Применение в промышленных условиях Field application	Прирост извлечения нефти варьируется от 1,3 до 18,2 % Increased oil recovery, ranging from 1.3 to 18.2%	1985–1993
Состав на основе полимера с цитратом алюминия [52] Polymer-based composition with aluminum citrate [52]	Применение в промышленных условиях Field application	Было извлечено 37 % нефти; 37% of the oil was recovered.	2000
Состав на основе полиакриламида с цитратом алюминия [46] Composition based on polyacrylamide with aluminum citrate [46]	Пилотные испытания Pilot tests	Обводненность снизилась на 19,8 %, нефтеотдача увеличилась на 10,5 % Water cut decreased by 19.8% and oil recovery increased by 10.5%	2006
Состав на основе полиакриламида и хрома [53] Polyacrylamide- and chromium-based composition [53]	Применение в промышленных условиях Field application	Дополнительное извлечение нефти составило 62000 м ³ Additional oil recovery was 62000 m ³	2014

В отличие от внутрипластовых полимерных гелей и коллоидных дисперсионных гелей, набухающие PPG более термостабильны в воде с высокой соленостью, то есть при замешивании на воде с высокой соленостью получают более прочные гели, по сравнению с замешиванием на воде с низкой минерализацией.



(а) Высушенные частицы (б) Набухшие частицы

Рис. 9. Изображения PPG до (а) и после набухания (б) [58]

Fig. 9. PPG images before (a) and after swelling (b) [58]

Обобщённо PPG имеют следующие характеристики: термическая стабильность – более 1 года при температуре ниже 140 °C (284 °F); прочность регулируемая; коэффициент набухания в пластовой воде от 1 до 100 раз относительно первоначального размера; большинство PPG стойкие ко всем видам пластовых вод различной минерализации и размеры PPG могут быть регулируемы от 10 мкм до нескольких сантиметров.

Предварительно сформированные гели изготавливаются на поверхности с помощью сшивки, а затем закачиваются в пласт [59].

Бай и др. [60] впервые разработали гель из PPG, который был эффективно применен для контроля добычи воды на нефтяном месторождении Дацин в Китае, где в скважину был закачан большой объем суспензии PPG с концентрацией 2–2,5 г/л и размером частиц 0,06–3,0 мм. К настоящему времени на большинстве нефтяных месторождений Китая с использованием PPG или их сочетания с другими гелями было обработано около 2000 скважин, охватывающих как терригенные, так и карбонатные коллекторы температурой от 20 до 110 °C и соленостью пластовой воды от 2 до 280 г/л. Масса PPG на обработку скважины колебалась от 8 до 40 т, а концентрация – от 1 до 5 г/л [61].

PPG можно использовать для выравнивания профиля приемистости в коллекторах с небольшими трещинами или каналами высокой проницаемости. Однако следует отметить, что PPG нельзя закачивать в пористые среды без высокопроницаемых трещин и каналов.

PPG, приготовленные с массовым соотношением АМ (акриламид), ДА (N,N-диметилакриламид) и АМПС (2-акриламид-2-метилпропансульфоновая кислота) 2:1:2, показали хорошую стабильность при высокой температуре – 145 °C, и минерализации хлорида натрия (NaCl) 225 г/л. Однако химическая структура сшивающего агента играет важную роль для термостойкости полимерных гелей. Когда,

например, N,N'-метилendiакриламид (МВА) используется в качестве сшивающего агента, амидные группы начинают разрушаться при температуре выше 100 °С и могут быть полностью повреждены при 150 °С, а растворимость полимерного геля увеличивается. Хлорид тетрааллиламмония (ТААС) лучше использовать в качестве сшивающего агента при температурах более 150 °С. Каждая молекула ТААС может образовывать два пятивариантных типа соединения через реакцию взаимодействия в процессе полимеризации, что может значительно улучшить структурную прочность и термостойкость геля [62].

В работах [63, 64] проанализированы различия в структурных изменениях МВА и ТААС при повышении температуры. При повышении температуры 3D-структура гидрогеля, сшитого с помощью ТААС, остается в стабильном состоянии в течение длительного времени. Даже если одна из четырех связей C-N разрушается при повышенной температуре, на абсорбцию воды это не влияет.

Ленджи и другие в [65] установили, что PPG обладает достаточной способностью к набуханию при температуре 100 °С и может эффективно изолировать высокопроницаемые каналы для блокировки потока воды.

На месторождениях России, в Западной Сибири, выделилась полимерно-гелевая система «РИТИН-10» [66], которая представляет собой состав высокомолекулярного полиакриламида (ПАА), подвергнутого модификации с использованием ионизирующего излучения (гамма-лучей). В результате этой обработки происходит формирование новых химических связей между молекулами ПАА, и образуются сшитые структуры, которые не растворяются в воде, но способны к набуханию в ней. Такой процесс позволяет обойтись без применения химических сшивателей.

В низкотемпературных (от 25 до 30 °С) месторождениях из-за отсутствия гидролитических процессов в полиакриламиде указанные композиции проявляют значительно меньшую степень набухаемости. Дополнительно процесс набухания подавляется увеличенным содержанием солей в пластовой воде. В Пермском крае при температуре пласта от 25 до 30 °С и при минерализации воды от 240 до 260 г/л данные технологии не показали эффективность [67]. Следует отметить, что на месторождениях России (конкретно в Западной Сибири) к настоящему времени имеется ограниченный опыт применения сшитых полимерных составов [68, 69].

PPG подразделяются на микрогели и макрогели. Их сравнительный анализ можно рассмотреть в табл. 6.

На рис. 10 можно увидеть структурное различие между макро- и микрогелями.

Таблица 6. Сравнительный анализ микрогеля и макрогеля [15]

Table 6. Comparative analysis of microgel and macrogel [15]

Параметр Parameter	Микрогель Microgel	Макрогель Macrogel
Проницаемость в пласте, мкм ² Permeability in the formation, μm ²	0,1–0,5	>0,5
Размер частиц, мкм Size of the particles themselves, μm	0,1–50	От 50 мкм до 1 см From 50 μm to 1 cm
Синтез Synthesis	Процесс синтеза – в обратной эмульсии Synthesis is in reverse emulsion	Однородный Homogeneous
Зона воздействия Exposure area	Удаленная зона пласта (УЗП) Remote formation zone (RZP)	Призабойная зона пласта (ПЗП) Bottomhole formation zone (BFZ)

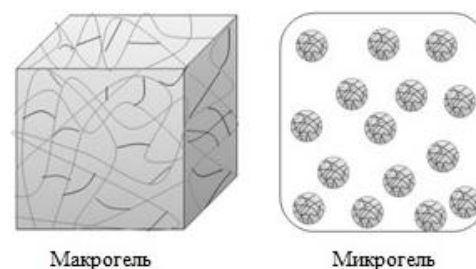


Рис. 10. Структурное различие между макрогелями и микрогелями [64]

Fig. 10. Structural difference between macrogels and microgels [64]

Микрогели

В 1999 г. микрогели были впервые представлены под брендом STARPOL в форме частиц из полимерного геля, созданного на основе акриламида и лактата циркония [70, 71].

Поскольку размер частиц макрогелей значительно превышает размер частиц микрогелей, их применение для закачки в пласт ограничено. Для воздействия на удаленную зону и формирования более глубоко проникающего экрана были разработаны микрогели [72, 73]. Такие гели обладают высокой устойчивостью к механическим, термическим и химическим воздействиям [74], а также способны селективно изменять характеристики относительной проницаемости для воды.

Таким образом, закачанные микрогелевые системы могут блокировать высокопроницаемые пропластки и направлять поток закачиваемой воды в менее проницаемые зоны, что способствует извлечению дополнительной нефти. Этот вид гелей подразделяют на две категории: микросферы и термически активированные микрочастицы.

Микросферы

Размер частиц полимерных микросфер, используемых в нефтяной промышленности, составляет от наноразмерного до микронного масштаба, и его можно регулировать [75]. Полимерные микросферы достаточно легко диспергируются в воде, образуют дисперсную систему [76] и обладают свойством набухания в воде благодаря своей пространственной структуре [77, 78].

Микросферы могут быть приготовлены из акриламида, смешанного с N,N'-метилendiакриламидом в качестве сшивающего агента и персульфатом аммония в качестве инициатора. Затем этот раствор постепенно распределяют по нефти при температуре реакции от 60 до 80 °C [79]. Через некоторое время (около 30 мин) смесь охлаждают, масляную фазу отделяют и удаляют, а микросферы собирают. Эти микросферы размером от нанометров до микрометров могут быть закачаны в пласт [80, 81].

В работе [82] выявлен состав микросфер, который был эффективно использован на месторождении для увеличения добычи нефти. Для формирования микросфер использовались акриламид, персульфат аммония и N,N'-метилен-бисакриламид. Микросферы стабильны при температуре 79 °C в течение 5 месяцев и выдерживают минерализацию 20000 ppm. Они могут расширяться в воде до пяти раз и обладают хорошими эластичными свойствами.

Ху и др. в своем эксперименте [83] усовершенствовали новый метод получения микросфер, используя двойную структуру сшивающих агентов, состоящую из акриламида, 2-акриламида-2-метилпропансульфоновой кислоты. Вязкость определяли для различных солей и N,N'-метиленакриламида в качестве нелабильных сшивающих мономеров и поли-этиленгликоль диакрилата в качестве прочного сшивающего мономера. Вязкость определяли для различной минерализации (30–100 г/л) при температуре 65 °C. Результаты показали, что способность набухания микрогеля с двойной сшивкой не чувствительна к солености, а вязкость раствора может увеличиваться до определенной степени с максимальным значением 18 мПа·с.

Термически активированные микрочастицы

Потокоотклоняющие технологии, использующие термически активированные микрочастицы, находящиеся в стадии разработки и промысловых испытаний, основаны на расширении термочувствительных микрочастиц, которые могут быть использованы для создания блокирующего эффекта при изменении температуры в нефтяном пласте. Когда частицы достигают области повышенных температур в резервуаре, происходит распад нестабильного сшивателя, и освобождаются ограничения на молекулу(ы) полимера в частице, что позволяет поглощать

воду и восстанавливать равновесие, увеличивая размер частиц, которые обеспечивают сопротивление потоку жидкости в пористой среде [84].

В исследовании [78] успешно разработан новый состав на основе диоксида кремния (SiO₂) и поверхностно-активного вещества (ПАВ), эффективный в температурном диапазоне от 60 до 100 °C и общей минерализации 52 мг/л, Ca²⁺ – 3308 мг/л и Mg²⁺ – 1820 мг/л. Результаты лабораторных исследований показали, что композитный полимерный гель обладает хорошей термостойкостью в течение длительного времени при оптимальной концентрации. В том числе после проведенного литературного обзора излагается, что одной из крупнейших задач нефтегазовой промышленности является решение проблемы термической стабильности путем применения термических активированных микрочастиц.

Объемные (макрогели) гели

Предварительно сформированные объемные гели изучались в основном для изоляции трещин и пустот [85, 86]. Макрогели обычно скапливаются в порах проницаемых каналов, поскольку их вязкость достаточно высока, и часто не распространяются через пористые среды, что в конечном итоге приводит к защите потенциальной продуктивной зоны нефтяного пласта. Широко используются на китайских нефтяных месторождениях [11].

В [87] разработан новый тип PPG для повышения нефтеотдачи, где устойчивость к температуре и долгосрочная стабильность улучшаются при использовании наноматериалов. Новый PPG синтезировали путем свободно радикальной полимеризации. Композиция состояла из акриламида и натриевой соли мономера 2-акриламида-2-метил-1-пропансульфоновой кислоты, которые смешивались в дистиллированной воде. В табл. 7 представлено обобщение применения предварительно сшитых гранулированных гелей.

Заключение

В ходе проведенного обзора по применению сшитых полимерных композиции для повышения нефтеотдачи были сделаны следующие выводы:

1. Рассмотренные в статье сшитые полимерные гели применяются на месторождениях с пластовой температурой от 25 до 150 °C, проницаемостью от 0,03 до 5 мкм² и приемистостью нагнетательных скважин от 150 до 1000 м³/сут в терригенных и карбонатных коллекторах.
2. Для повышения нефтеотдачи широко применяются синтетические полимеры и биополимеры. Наиболее распространенным синтетическим полимером является гидролизированный полиакриламид, а среди биополимеров широко известна ксантановая камедь.

Таблица 7. Обобщённые результаты практического и эффективного применения предварительно сшитых гранулированных гелей

Table 7. Summarized results of practical and effective application of pre-crosslinked granular gels

Краткое описание состава композиции Summary of the composition	Применение Application	Полученные результаты Results obtained	Год Year
Состав включал в себя основу полиакриламида [66] Composition included a polyacrylamide base [66]	Применение в промышленных условиях Field application	Дополнительная добыча нефти на каждой скважине составила 1046 т Additional oil production at each well was 1046 t	2002–2005
Композиция состояла из акриламида, персульфата аммония и N,N'-метилден-бисакриламида [82] Composition consisted of acrylamide, ammonium persulfate and N,N'-methylene bisacrylamide [82]	Лабораторное исследование Laboratory investigation	Результаты экспериментов показали, что эти микросферы стабильны в растворах с 20000 ppm при температуре 79 °C Experimental results showed that these microspheres are stable in solutions with 20000 ppm at 79°C	2011
Композиция состояла из акриламида, 2-акриламидо-2-метилпропансульфоновой кислоты и 1-винил-2-пирролидинона [83] Composition consisted of acrylamide, 2-acrylamido-2-methylpropanesulfonic acid and 1-vinyl-2-pyrrolidinone [83]		Результаты эксперимента показали, что микросферы обладают высокой термической стабильностью и могут существовать в водном растворе при температуре 120 °C в течение 19 дней Experimental results showed that the microspheres have high thermal stability and can exist in aqueous solution at 120 °C for 19 days	2014
Композиция состояла из полиакриламида и наногидрата нитрата алюминия [65] Composition consisted of polyacrylamide and aluminum nitrate nanohydrate [65]		Результаты испытаний показали, что PPG снижает количество воды на 30–65 % Test results have shown that PPG reduces water by 30–65%	2018
Композиция состояла из амфифильного полимера, резорцинола/гексаметиленetetрамина и диоксида кремния [78] Composition consisted of an amphiphilic polymer, resorcinol/hexamethylenetetramine and silicon dioxide [78]		Композитный гель также показал высокую термическую стабильность при 60 °C в течение 90 дней Composite gel also showed high thermal stability at 60°C for 90 days	2018
Композиция состояла из акриламида и мономера натриевой соли 2-акриламидо-2-метил-1-пропансульфоновой кислоты [87] Composition consisted of acrylamide and a monomer of the sodium salt of 2-acrylamido-2-methyl-1-propanesulfonic acid [87]		Применяется для пластов с температурой более 60 °C Applicable for reservoirs with temperatures above 60°C	2020

3. Сшитые полимерные композиции можно разделить на гели с внутрипластовым гелированием, коллоидно-дисперсные гели и предварительно сшитые гранулированные гели. Каждый тип имеет свои особенности и применяется в зависимости от конкретных условий месторождения.
4. В составе полимерных гелей с внутрипластовым гелированием используются как неорганические, так и органические сшиватели. Наиболее часто применяемым неорганическим сшивателем являются реагенты, содержащие хром, а среди органических сшивателей широко используется фенол-формальдегид. В зависимости от состава композиции, сшивка полимеров происходит при температуре от 25 до 150 °C и при минерализации до 80 г/л.
5. В коллоидно-дисперсных составах чаще всего используется частично гидролизированный полиакриламид, а в качестве сшивателя наиболее часто применяется цитрат алюминия. Эти гели эффективно используются при минерализации на уровне 5 г/л и при пластовой температуре до 90 °C.
6. Предварительно сшитые гранулированные гели изготавливаются из полиакриламида и сшивающих реагентов, подразделяются на микрогели (микросферы и термически активированные микрочастицы) и макрогели. В качестве сшивателя применяется N,N'-метилдендиакриламид. Составы могут использоваться при пластовой температуре от 20 до 140 °C при минерализации пластовой воды от 2 до 280 г/л.
7. Перспективными являются гели на основе полиакриламида различных модификаций с использованием сшивателей внутрипластового гелирования. Дальнейшие исследования будут направлены на разработку собственной композиции, а также на расширение области её применения в различных геолого-физических условиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Okeke T., Lane R. Simulation and economic screening of improved oil recovery methods with emphasis on injection profile control including waterflooding, polymer flooding and a thermally activated deep diverting gel // Society of Petroleum Engineers

- Western Regional Meeting. – California, 19–23 March, 2012. – Texas, Texas A&M University. Publ., 2012. – P. 323–336. DOI: 10.2118/153740-MS.
2. Investigation of the selectivity of the water shutoff technology / V. Duryagin, T. Nguyen Van, N. Onegov, G. Shamsutdinova // *Energies*. – 2022. – Vol. 16. – P. 366. DOI: 10.3390/EN16010366.
 3. Dvoynikov M., Kuchin V., Mintshev M.S. Development of viscoelastic systems and technologies for isolating water-bearing horizons with abnormal formation pressures during oil and gas wells drilling // *Journal of Mining Institute*. – 2021. – Vol. 247. – P. 57–65. DOI: 10.31897/PMI.2021.1.7.
 4. Ковальчук Т.Н., Гильманов А.Я., Шевелёв А.П. Методика расчета дополнительной накопленной добычи нефти после применения технологии выравнивания профиля приемистости // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2022. – Т. 333. – № 6. – С. 131–139. DOI: 10.18799/24131830/2022/6/3588.
 5. Rogachev M.K., Mukhametshin V., Kuleshova L.S. Improving the efficiency of using resource base of liquid hydrocarbons in jurassic deposits of western Siberia // *Journal of Mining Institute*. – 2019. – Vol. 240. – P. 711–715. DOI: 10.31897/PMI.2019.6.711.
 6. Podoprigora D., Byazrov R., Sytnik J. The comprehensive overview of large-volume surfactant slugs injection for enhancing oil recovery: status and the outlook // *Energies*. – 2022. – Vol. 15. – P. 8300. DOI: 10.3390/EN15218300.
 7. Multi-criteria decision-making approaches to select appropriate enhanced oil recovery techniques in petroleum industries / Z. Wei, S. Zhu, X. Dai, X. Wang, I. Raupov // *Energy Reports*. – 2021. – Vol. 7. – P. 2751–2758. DOI: 10.1016/J.EGYR.2021.05.002.
 8. Injection of gelling systems to a layered reservoir for conformance improvement / K. Fedorov, A. Shevelev, A. Gilmanov, A. Arzhylovskiy, D. Anuriev, I. Vidysh, N. Morozovskiy // *Gels*. – 2022. – Vol. 8. – P. 621. DOI: 10.3390/GELS8100621.
 9. Mardashov D.V. Development of blocking compositions with a bridging agent for oil well killing in conditions of abnormally low formation pressure and carbonate reservoir rocks // *Journal of Mining Institute*. – 2021. – Vol. 251. – P. 667–677. DOI: 10.31897/PMI.2021.5.6.
 10. Raupov I., Shagiakhmetov A. The results of the complex rheological studies of the cross-linked polymer composition and the grounding of its injection volume // *International Journal of Civil Engineering and Technology*. – 2019. – Vol. 10. – P. 493–509. URL: <http://www.iaeme.com/ijciat/issues.asp?JType=IJCIET&VType=10&IType=02> (дата обращения 07.05.2024).
 11. Liu Y., Bai B., Shuler P.J. Application and development of chemical-based conformance control treatments in China oil fields // *Proceedings – SPE Symposium on Improved Oil Recovery*. – Oklahoma, 17–21 April 2006. – P. 434–443. DOI: 10.2118/99641-MS.
 12. Practical application of flow diversion techniques for development of fractured carbonate reservoirs / A. Chorniy, I. Khodakov, D. Popov, I. Tkachev et al. // *Society of Petroleum Engineers – SPE Russian Petroleum Technology Conference*. – Moscow, 22–24 October 2019. DOI: 10.2118/196855-MS.
 13. Shagiakhmetov A., Yushchenko S. Substantiation of in situ water shut-off technology in carbonate oil reservoirs // *Energies*. – 2022. – Vol. 15. – P. 5059. DOI: 10.3390/EN15145059.
 14. Implementation of water treatment processes to optimize the water saving in chemically enhanced oil recovery and hydraulic fracturing methods / C. Zhang, X. Long, X. Tang, A. Lekontsev, G. Korobov // *Energy Reports*. – 2021. – Vol. 7. – P. 1720–1727. DOI: 10.1016/J.EGYR.2021.03.027.
 15. Анализ мирового опыта применения технологий выравнивания профилей приемистости на основе сшитых полимерных гелей / Ю.А. Кетова, С.В. Галкин, А.С. Вотинов, В. Канг, Х. Янг // *Нефтегазовое и горное дело*. – 2020. – Т. 20. – № 2. – С. 150–161. DOI: 10.15593/2224-9923/2020.2.5.
 16. Синтез и свойства модифицированной ксантановой камеди / И.И. Осовская, А.М. Бородина, А.В. Курзин, В.И. Рошин // *Химия растительного сырья*. – 2021. – № 4. – С. 95–104. DOI: 10.14258/jcrpm.2021049525.
 17. Bai B., Zhou J., Yin M. A comprehensive review of polyacrylamide polymer gels for conformance control comprehensive review of polyacrylamide polymer gels for conformance control // *Petroleum Exploration and Development*. – 2015. – Vol. 42. – P. 525–532. DOI: 10.1016/S1876-3804(15)30045-8.
 18. Polymer-nanosilica-assisted to evaluate oil recovery performances in sandstone reservoirs / G. Fan, M. Li, X. Chen, A. Palyanitsina, A. Timoshin // *Energy Reports*. – 2021. – Vol. 7. – P. 2588–2593. DOI: 10.1016/J.EGYR.2021.04.047.
 19. Zhu D., Bai B., Hou J. Polymer gel systems for water management in high-temperature petroleum reservoirs: a chemical review // *Energy and Fuels*. – 2017. – Vol. 31. – P. 13063–13087. DOI: 10.1021/ACS.ENERGYFUELS.7B02897.
 20. Неклеа Р.С., Морозюк О.А. Цифровое моделирование потокооклоняющих технологий: обзор аналитических моделей для описания физико-химических свойств сшитых полимерных гелей // *Недропользование*. – 2022. – Т. 22. – № 3. – С. 126–138. DOI: 10.15593/2712-8008/2022.3.4.
 21. A critical review on use of polymer microgels for conformance control purposes / M. Abdulkali, C. Huh, K. Sepehrmoori, M. Delshad, A. Varavei // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2014. – Vol. 122. – P. 741–753. DOI: 10.1016/J.PETROL.2014.06.034.
 22. Synthesis and application of water-soluble phenol-formaldehyde resin crosslinking agent / Z. Wang, S. Gao, J. You, J. Yu, T. Jiang et al. // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – Bangkok, 10–12 March 2017. – P. 012150. DOI: 10.1088/1755-1315/61/1/012150.
 23. Gelation behavior study of a resorcinol-hexamethyleneteramine crosslinked polymer gel for water shut-off treatment in low temperature and high salinity reservoirs / Y. Sun, Y. Fang, A. Chen, Q. You, C. Dai, R. Cheng, Y. Liu // *Energies*. – 2017. – Vol. 10. – P. 913. DOI: 10.3390/EN10070913.
 24. Effect of different phenolic compounds on performance of organically cross-linked terpolymer gel systems at extremely high temperatures / D. Zhu, J. Hou, X. Meng, Z. Zheng, Q. Wei, Y. Chen, B. Bai // *Energy and Fuels*. – 2017. – Vol. 31. – P. 8120–8130. DOI: 10.1021/ACS.ENERGYFUELS.7B01386.
 25. Permeability modification with sulfomethylated resorcinol-formaldehyde gel system / Y. Zhuang, S. Pandey, C.S. McCool, G.P. Willhite // *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*. – 2000. – Vol. 3. – P. 386–393. DOI: 10.2118/66045-PA.
 26. Hutchins R.D., Dovan H.T., Sandiford B.B. Field applications of high temperature organic gels for water control // *Proceedings – SPE Symposium on Improved Oil Recovery*. – 1996. – Vol. 2. – P. 419–426. DOI: 10.2118/35444-MS.
 27. Influence of polymer structure on the gelation kinetics and gel strength of acrylamide-based copolymers, bentonite and polyethylenimine systems for conformance control of oil reservoirs / F. Tessarolli, S. Souza, A. Gomes, C. Mansur // *Journal of Applied Polymer Science*. – 2019. – Vol. 136. – P. 47556. DOI: 10.1002/APP.47556.

28. Organically crosslinked polymer system for water reduction treatments in Mexico / J. Vasquez, I. Jurado, A. Santillan, R. Hernandez // Society of Petroleum Engineers – 1st International Oil Conference and Exhibition. – Mexico, 31 August–2 September 2006. – P. 924–931. DOI: 10.2118/104134-MS.
29. Successful combination of an organically crosslinked polymer system and a rigid-setting material for conformance control in Mexico / C. Deolarte, J. Vasquez, E. Soriano, A. Santillan // SPE Production & Operations. – 2009. – Vol. 24. – P. 522–529. DOI: 10.2118/112411-PA.
30. pH sensitive polymers for novel conformance control and polymerflood applications / S. Choi, M. Sharma, C. Huh, S. Bryant // Proceedings – SPE International Symposium on Oilfield Chemistry. – Texas, 20–22 April 2009. – P. 758–780. DOI: 10.2118/121686-MS.
31. Eoff L., Dalrymple D., Everett D. Global field results of a polymeric gel system in conformance applications // SPE Russian Oil and Gas Technical Conference and Exhibition. – Moscow, 3–6 October 2006. – P. 280–285. DOI: 10.2118/101822-MS.
32. Pu J., Geng J., Bai B. Effect of the chromium ion diffusion in polyacrylamide/chromium acetate gelation system with surrounding water on gelation behavior // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2018. – Vol. 171. – P. 1067–1076. DOI: 10.1016/J.PETROL.2018.08.014.
33. Formation and propagation of gel aggregates using partially hydrolyzed polyacrylamide and aluminum citrate / A. Al-Assi, G. Willhite, D. Green, C. McCool // SPE Journal. – 2009. – Vol. 14. – P. 450–461. DOI: 10.2118/100049-PA.
34. Effects of cyclodextrin polymer on the gelation of amphiphilic polymer in inclusion complex / H. Zhang, H. Yang, B. Zhou, X. Li, H. Zhao et al. // Journal of Molecular Liquids. – 2020. – Vol. 305. – P. 112850. DOI: 10.1016/J.MOLLIQ.2020.112850.
35. Никитин М.Н., Петухов А.В. Гелеобразующий состав на основе силиката натрия для ограничения водопритока в сложнопостроенных трещинных коллекторах // Электронный научный журнал нефтегазовое дело. – 2011. – № 5. – С. 143–153. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=17998412> (дата обращения 16.05.2024).
36. Moradi-Araghi A. A review of thermally stable gels for fluid diversion in petroleum production // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2000. – Vol. 26. – P. 1–10. DOI: 10.1016/S0920-4105(00)00015-2.
37. The advances of organic chromium-based polymer gels and their application in improved oil recovery / H. Zhang, H. Yang, B. Sarsenbekuly, M. Zhang, H. Jiang, W. Kang, S. Aidarova // Advances in Colloid and Interface Science. – 2020. – Vol. 282. – P. 102214. DOI: 10.1016/J.CIS.2020.102214.
38. Sydansk R.D. A newly developed chromium(III) gel technology // SPE Reservoir Engineering. – 1990. – Vol. 5. – P. 346–352. DOI: 10.2118/19308-PA.
39. Lockhart T.P. Chemical properties of chromium/polyacrylamide gels // SPE Advanced Technology Series. OnePetro. Milan – 1994. – V. 2. – P. 199–205. DOI: 10.2118/20998-PA.
40. Experimental research on amphiphilic polymer/organic chromium gel for high salinity reservoirs / H. Yang, M. Iqbal, Z. Lashari, C. Cao, X. Tang, W. Kang // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. – 2019. – Vol. 582. – P. 123900. DOI: 10.1016/J.COLSURFA.2019.123900.
41. Mumallah N.A. Chromium (III) propionate: a crosslinking agent for water-soluble polymers in hard oilfield brines // SPE Reservoir Engineering. – 1988. – Vol. 3. – P. 243–250. DOI: 10.2118/15906-PA.
42. Zhang L., Khan N., Pu C. Influence of salinity on the properties of the different HPAM/Al³⁺ systems // Oil & Gas Science and Technology – Revue d'IFP Energies Nouvelles. – 2019. – Vol. 74. – P. 37. DOI: 10.2516/OGST/2019011.
43. Sharma P., Kudapa V.K. Study on the effect of cross-linked gel polymer on water shutoff in oil wellbores // Materials Today: Proceedings. – 2022. – Vol. 48. – P. 1103–1106. DOI: 10.1016/J.MATPR.2021.07.506.
44. Smith J.E. Performance of 18 polymers in aluminum citrate colloidal dispersion gels // SPE International Symposium on Oilfield Chemistry. – Texas, 14–17 February 1995. DOI: 10.2118/28989-MS.
45. Mack J.C., Smith J.E. In-depth colloidal dispersion gels improve oil recovery efficiency // SPE/DOE Improved Oil Recovery Symposium. – Oklahoma, 17–20 April 1994. DOI: 10.2118/27780-MS.
46. Successful field pilot of in-depth colloidal dispersion gel (CDG) technology in Daqing oil field / H. Chang, X. Sui, L. Xiao, Z. Guo, Y. Yao, Y. Xiao, G. Chen, K. Song, J. Mack // SPE Reservoir Evaluation & Engineering. – 2006. – Vol. 9. – P. 664–673. DOI: 10.2118/89460-PA.
47. Fielding R.C., Gibbons D.H., Legrand F.P. In-depth drive fluid diversion using an evolution of colloidal dispersion gels and new bulk gels: an operational case history of north rainbow ranch unit // Proceedings - SPE Symposium on Improved Oil Recovery. – 1994. – Vol. 1. – P. 433–444. DOI: 10.2118/27773-MS.
48. Performance and evaluation methods of colloidal dispersion gels in the daqing oil field / X. Lu, K. Song, J. Niu, F. Chen // Proceedings of the SPE Asia Pacific Conference on Integrated Modelling for Asset Management. – Yokohama, 25–26 April 2000. – P. 615–625. DOI: 10.2118/59466-MS.
49. In-depth fluid diversion by pre-gelled particles. Laboratory study and pilot testing / J. Coste, Y. Liu, B. Bai, Y. Li, P. Shen, Z. Wang, G. Zhu // SPE/DOE Improved Oil Recovery Symposium. – Oklahoma, 3–5 April 2000. DOI: 10.2118/59362-MS.
50. Colloidal dispersion gels (CDG): field projects review / E. Manrique, S. Reyes, J. Romero, N. Aye, M. Kiani, W. North, C. Thomas, M. Kazempour, M. Izadi, A. Roostapour // Society of Petroleum Engineers – SPE EOR Conference at Oil and Gas West Asia 2014: Driving Integrated and Innovative EOR. – Oman, March 31–April 2 2014. – P. 476–488. DOI: 10.2118/169705-MS.
51. Khamees T., Flori R. Investigating the propagation of the colloidal dispersion gel (CDG) in thick heterogeneous reservoirs using numerical simulation // American Journal of Science, Engineering and Technology. – 2019. – Vol. 4. – P. 1–17. DOI: 10.11648/j.ajset.20190401.11.
52. Smith J., Liu H., Guo Z. Laboratory studies of in-depth colloidal dispersion gel technology for Daqing oil field // SPE/AAPG Western Regional Meetings. – California, 19–22 June 2000. – P. 533–545. DOI: 10.2118/62610-MS.
53. CDG in a heterogeneous fluvial reservoir in Argentina: pilot and field expansion evaluation / D. Diaz, N. Saez, M. Cabrera, E. Manrique, J. Romero, M. Kazempour, N. Aye // Society of Petroleum Engineers – SPE Asia Pacific Enhanced Oil Recovery Conference. – Malaysia, 11–13 August 2015. – P. 1526–1538. DOI: 10.2118/174704-MS.
54. Nguyen M., Ponomarenko T., Nguyen N. Energy transition in Vietnam: a strategic analysis and forecast // Sustainability. – 2024. – Vol. 16. – P. 1969. DOI: 10.3390/SU16051969.

55. Experimental study of the gelation behavior of a polyacrylamide/aluminum citrate colloidal-dispersion gel system / R. Ranganathan, R. Lewis, C. McCool, D. Green, G. Willhite // *SPE Journal*. – 1998. – Vol. 3. – P. 337–343. DOI: 10.2118/52503-PA.
56. Imqam A., Wang Z., Bai B. Preformed-particle-gel transport through heterogeneous void-space conduits // *SPE Journal*. – 2017. – Vol. 22. – P. 1437–1447. DOI: 10.2118/179705-PA.
57. Sun X., Bai B. Dehydration of polyacrylamide-based super-absorbent polymer swollen in different concentrations of brine under CO₂ conditions // *Fuel*. – 2017. – Vol. 210. – P. 32–40. DOI: 10.1016/J.FUEL.2017.08.047.
58. Bai B., Wei M., Liu Y. Field and lab experience with a successful preformed particle gel conformance control technology // *SPE Production and Operations Symposium, Proceedings*. – 2013. – P. 506–522. DOI: 10.2118/164511-MS.
59. Nanoparticle stabilized CO₂ foam: effect of different ions / J. San, S. Wang, J. Yu, R. Lee, N. Liu // *SPE – DOE Improved Oil Recovery Symposium Proceedings*. – Oklahoma, 11–13 April 2016. DOI: 10.2118/179628-MS.
60. Preformed particle gel for conformance control: factors affecting its properties and applications / B. Bai, L. Li, Y. Liu, H. Liu, Z. Wang, C. You // *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*. – 2007. – Vol. 10. – P. 415–422. DOI: 10.2118/89389-PA.
61. Case study on preformed particle gel for in-depth fluid diversion / B. Bai, F. Huang, Y. Liu, R. Seright, Y. Wang // *Proceedings – SPE Symposium on Improved Oil Recovery*. – 2008. – Vol. 3. – P. 1438–1455. DOI: 10.2118/113997-MS.
62. Synthesis and swelling behavior of a high temperature-resistant superabsorbent / W. Wu, T. Chen, X. Wang, L. Li, R. Wu, X. Zhang // *Journal of Polymer Materials*. – 2015. – Vol. 32. – Iss. 4. – P. 361.
63. Preparation and swelling behaviors of a high temperature resistant superabsorbent using tetraallylammonium chloride as crosslinking agent / X. Zhang, X. Wang, L. Li, S. Zhang, R. Wu // *Reactive and Functional Polymers*. – 2015. – Vol. 87. – P. 15–21. DOI: 10.1016/J.REACTFUNCTPOLYM.2014.12.006.
64. Progress of polymer gels for conformance control in oilfield / W. Kang, X. Kang, Z. Lashari, Z. Li, B. Zhou, H. Yang, B. Sarsenbekuly // *Advances in Colloid and Interface Science*. – 2021. – Vol. 289. – P. 102363. DOI: 10.1016/J.CIS.2021.102363.
65. Experimental study of swelling and rheological behavior of preformed particle gel used in water shutoff treatment / M. Lenji, M. Haghsheenasfard, M. Sefti, M. Salehi, A. Heidari // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2018. – Vol. 169. – P. 739–747. DOI: 10.1016/J.PETROL.2018.06.029.
66. Идиллятуллин А.Р. РИТИН-10: новый эффективный реагент для повышения нефтеотдачи пластов // *Нефтяное хозяйство*. – 2007. – № 2. – С. 54–58.
67. Галкин С.В., Рожкова Ю.А. Анализ опыта применения предварительно сшитых полимерных гелей при разработке высокообводненных эксплуатационных объектов в условиях низкотемпературных нефтяных пластов // *Записки Горного института*. – 2024. – Т. 265. – С. 55–64.
68. Testing of preformed particles polymer gel technology on core filtration models to limit water inflows / Y. Ketova, B. Bai, G. Khizhnyak, E. Gladkikh, S. Galkin // *Journal of Mining Institute*. – 2020. – Vol. 241. – P. 91–96. DOI: 10.31897/PMI.2020.1.91.
69. Sun D., Tananykhin D., Saychenko L. An environmental study on reorganizing the reservoir pressure maintenance system for western Siberia oil fields // *Ekoloji*. – 2018. – Vol. 27. – P. 1175–1180.
70. Zaitoun A., Dupuis G. Conformance control using SMG microgels: laboratory evaluation and first field results // *Society of Petroleum Engineers – SPE Europec Featured at 79th EAGE Conference and Exhibition*. – France, 12–15 June 2017. – P. 607–616. DOI: 10.2118/185864-MS.
71. Using microgels to shut off water in a gas storage well / A. Zaitoun, R. Tabary, D. Rousseau, T. Pichery, S. Nouyoux, P. Mallo, O. Braun // *Proceedings – SPE International Symposium on Oilfield Chemistry*. – Texas, February 28–March 2, 2007. – P. 221–228. DOI: 10.2118/106042-MS.
72. Data analysis and application guidelines for the microgel field applications / Y. Qiu, M. Wei, B. Bai, C. Mao // *Fuel*. – 2017. – Vol. 210. – P. 557–568. DOI: 10.1016/J.FUEL.2017.08.094.
73. New laboratory study and transport model implementation of microgels for conformance and mobility control purposes / A. Goudarzi, A. Almohsin, P. Taksaudom, S. Hosseini, V. Abdoljalil, M. Delshad, B. Bai, K. Sepehrmoori // *Fuel*. – 2017. – Vol. 192. – P. 158–168. DOI: 10.1016/J.FUEL.2016.11.111.
74. Review of microgels for enhanced oil recovery: properties and cases of application / Y. Rozhkova, D. Burin, S. Galkin, H. Yang // *Gels*. – 2022. – Vol. 8. – P. 112. DOI: 10.3390/GELS8020112.
75. Al-Ibadi A., Civan F. Experimental investigation and correlation of treatment in weak and high-permeability formations by use of gel particles // *SPE Production & Operations*. – 2013. – Vol. 28. – P. 387–401. DOI: 10.2118/153557-PA.
76. A new approach to evaluate the particle growth and sedimentation of dispersed polymer microsphere profile control system based on multiple light scattering / H. Yang, W. Kang, Y. Yu, X. Yin, P. Wang, X. Zhang // *Powder Technol.* – 2017. – Vol. 315. – P. 477–485. DOI: 10.1016/J.POWTEC.2017.04.001.
77. Swelling behaviours of N-alkylacrylamide gels in water: effects of copolymerization and crosslinking density / H. Inomata, N. Wada, Y. Yagi, S. Goto, S. Saito // *Polymer*. – 1995. – Vol. 36. – P. 875–877. DOI: 10.1016/0032-3861(95)93120-B.
78. Experimental research of high strength thermally stable organic composite polymer gel / Z. Lashari, H. Yang, Z. Zhu, X. Tang, C. Cao, M. Iqbal, W. Kang // *Journal of Molecular Liquids*. – 2018. – Vol. 263. – P. 118–124. DOI: 10.1016/J.MOLLIQ.2018.04.146.
79. A study of factors affecting properties of AM/AMPS/NVP terpolymeric microspheres prepared by inverse suspension polymerization / J. Jiang, Q. Zhao, M. Lin, Y. Wang, S. Dang, F. Sun // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2015. – Vol. 103. DOI: 10.1088/1757-899X/103/1/012046.
80. Conformance control mechanism of low elastic polymer microspheres in porous medium / H. Yang, B. Zhou, T. Zhu, P. Wang, X. Zhang, T. Wang, F. Wu, L. Zhang, W. Kang, Y. Ketova // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2021. – Vol. 196. – P. 107708. DOI: 10.1016/J.PETROL.2020.107708.
81. Investigation into the flow mechanism of nano-elastic microspheres during water invasion / H. Zhang, H. Liu, J. Hong, J. Liu, Y. Yang, Z. Liu, M. Abdullah, H. Yang, H. Yu et al. // *Processes*. – 2023. – Vol. 11. – P. 3342. DOI: 10.3390/PR11123342.

82. Lei G., Li L., Nasr-El-Din H. New gel aggregates to improve sweep efficiency during waterflooding // *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*. – 2011. – Vol. 14. – P. 120–128. DOI: 10.2118/129960-PA.
83. Swelling mechanism investigation of microgel with double-cross-linking structures / H. Jia, Q. Ren, W. Pu, J. Zhao // *Energy and Fuels*. – 2014. – Vol. 28. – P. 6735–6744. DOI: 10.1021/EF5012325.
84. Characteristics of composite microspheres for in-depth profile control in oilfields and the effects of polymerizable silica nanoparticles / X. Tang, W. Kang, B. Zhou, Y. Gao, C. Cao, S. Guo, M. Iqbal, H. Yang // *Powder Technol.* – 2020. – Vol. 359. – P. 205–215. DOI: 10.1016/J.POWTEC.2019.09.070.
85. New insight into wormhole formation in polymer gel during water chase floods with positron emission tomography / B. Brattekas, M. Steinsbo, A. Graue, M. Ferno, H. Espedal, R. Seright // *SPE Journal*. – 2017. – Vol. 22. – P. 32–40. DOI: 10.2118/180051-PA.
86. Seright R., Lane R., Sydansk R. A strategy for attacking excess water production // *SPE Production & Facilities*. – 2003. – Vol. 18. – P. 158–169. DOI: 10.2118/84966-PA.
87. Khoshkar P., Fatemi M., Ghazanfari M. Static and dynamic evaluation of the effect of nanomaterials on the performance of a novel synthesized PPG for water shut-off and improved oil recovery in fractured reservoirs // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2020. – Vol. 189. – P. 107019. DOI: 10.1016/J.PETROL.2020.107019.

Информация об авторах

Дмитрий Георгиевич Подопригора, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой разработки и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II, Россия, 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я линия Васильевского острова, 2. podoprighora_dg@pers.spmi.ru; <https://orcid.org/0000-0001-9481-5451>

Франшишко Джессика Маркушина, аспирант кафедры разработки и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II, Россия, 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я линия Васильевского острова, 2. s233002@stud.spmi.ru; <https://orcid.org/0009-0004-4931-3881>

Поступила в редакцию: 12.08.2024

Поступила после рецензирования: 28.10.2024

Принята к публикации: 21.04.2025

REFERENCES

1. Okeke T., Lane R. Simulation and economic screening of improved oil recovery methods with emphasis on injection profile control including waterflooding, polymer flooding and a thermally activated deep diverting gel. *Society of Petroleum Engineers Western Regional Meeting*. Texas, March 19–23, 2012. Texas, Texas A&M University Publ., 2012. pp 323–336. DOI: 10.2118/153740-MS.
2. Duryagin V., Nguyen Van T., Onegov N., Shamsutdinova G. Investigation of the selectivity of the water shutoff technology. *Energies*, 2023, vol. 16, pp. 366. DOI: 10.3390/EN16010366.
3. Dvoynikov M.V., Kuchin V.N., Mintshev M.S. Development of viscoelastic systems and technologies for isolating water-bearing horizons with abnormal formation pressures during oil and gas wells drilling. *Journal of Mining Institute*, 2021, vol. 247, pp. 57–65. DOI: 10.31897/PMI.2021.1.7.
4. Kovalchuk T.N., Gilmanov A.Y., Shevelev A.P. Methodology for calculating the cumulative oil recovery after applying the conformance control technology. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, no. 6, pp. 131–139. (In Russ.) DOI: 10.18799/24131830/2022/6/3588.
5. Rogachev M.K., Mukhametshin V.V., Kuleshova L.S. Improving the efficiency of using resource base of liquid hydrocarbons in Jurassic deposits of western Siberia. *Journal of Mining Institute*, 2019, vol. 240, pp. 711–715. DOI: 10.31897/PMI.2019.6.711.
6. Podoprighora D., Byazrov R., Sytnik J. The comprehensive overview of large-volume surfactant slugs injection for enhancing oil recovery: status and the outlook. *Energies*, 2022, vol. 15, pp. 8300. DOI: 10.3390/EN15218300.
7. Wei Z., Zhu S., Dai X., Wang X., Yapanto L.M., Raupov I.R. Multi-criteria decision making approaches to select appropriate enhanced oil recovery techniques in petroleum industries. *Energy Reports*, 2021, vol. 7, pp. 2751–2758. DOI: 10.1016/J.EGYR.2021.05.002.
8. Fedorov K., Shevelev A., Gilmanov A., Arzhylovskiy A., Anuriev D., Vidysh I., Morozovskiy N. Injection of gelling systems to a layered reservoir for conformance improvement. *Gels*, 2022, vol. 8, pp. 621. DOI: 10.3390/GELS8100621.
9. Mardashov D.V. Development of blocking compositions with a bridging agent for oil well killing in conditions of abnormally low formation pressure and carbonate reservoir rocks. *Journal of Mining Institute*, 2021, vol. 251, pp. 667–677. DOI: 10.31897/PMI.2021.5.6.
10. Raupov I., Shagiakhmetov A., Raupov I.R., Shagiakhmetov A.M. The results of the complex rheological studies of the cross-linked polymer composition and the grounding of its injection volume. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 2019, vol. 10, pp. 493–509. Available at: <http://www.iaeme.com/ijciat/issues.asp?JType=IJCIAT&VType=10&IType=02> (accessed 7 May 2024).
11. Liu Y., Bai B., Shuler P.J. Application and development of chemical-based conformance control treatments in China oil fields. *Proceedings – SPE Symposium on Improved Oil Recovery*. Tulsa, April 17–21, 2006. pp. 434–443. DOI: 10.2118/99641-MS.
12. Chorniy A., Khodakov I., Popov D., Tkachev I., Sadreev E., Makarshin S., Petrakov A., Rogova T., Churanova N., Kubrak M. Practical application of flow diversion techniques for development of fractured carbonate reservoirs. *Society of Petroleum Engineers – SPE Russian Petroleum Technology Conference*. Moscow, October 22–24, 2019. DOI: 10.2118/196855-MS.

13. Shagiakhmetov A., Yushchenko S. Substantiation of in situ water shut-off technology in carbonate oil reservoirs. *Energies*, 2022, vol. 15, pp. 5059. DOI: 10.3390/EN15145059.
14. Zhang C., Long X., Tang X., Lekontsev A., Korobov G.Y. Implementation of water treatment processes to optimize the water saving in chemically enhanced oil recovery and hydraulic fracturing methods. *Energy Reports*, 2021, vol. 7, pp. 1720–1727. DOI: 10.1016/J.EGYR.2021.03.027.
15. Ketova Iu.A., Galkin S.V., Votinov A.S., Kang W., Yang H. Analysis of the international practice in application of conformance control technologies based on cross-linked polymer gels. *Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering*, 2020, vol. 20, no. 2, pp. 150–161. (In Russ.) DOI: 10.15593/2224-9923/2020.2.5.
16. Osovskaya I.I., Borodina A.M., Kurzin A.V., Roshchin V.I. Synthesis and properties of modified xanthan gum. *Khimiya Rastitelnogo Syrya*, 2021, pp. 95–104. (In Russ.) DOI: 10.14258/JCPRM.2021049525.
17. Bai B., Zhou J., Yin M. A comprehensive review of polyacrylamide polymer gels for conformance control. *Petroleum Exploration and Development*, 2015, vol. 42, pp. 525–532. DOI: 10.1016/S1876-3804(15)30045-8.
18. Fan G., Li M., Chen X., Palyanitsina A., Timoshin A. Polymer-nanosilica-assisted to evaluate oil recovery performances in sandstone reservoirs. *Energy Reports*, 2021, vol. 7, pp. 2588–2593. DOI: 10.1016/J.EGYR.2021.04.047.
19. Zhu D., Bai B., Hou J. Polymer gel systems for water management in high-temperature petroleum reservoirs: a chemical review. *Energy and Fuels*, 2017, vol. 31, pp. 13063–13087. DOI: 10.1021/ACS.ENERGYFUELS.7B02897.
20. Neklesa R.S., Morozuk O.A. Digital simulation of flow diverting technologies: a review of analytical models for describing the physicochemical properties of cross-linked polymer gels. *Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering*, 2022, vol. 22, no. 3, pp. 126–138. (In Russ.) DOI: 10.15593/2712-8008/2022.3.4.
21. Abdulbaki M., Huh C., Sepehrnoori K., Delshad M., Varavei A. A critical review on use of polymer microgels for conformance control purposes. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2014, vol. 122, pp. 741–753. DOI: 10.1016/J.PETROL.2014.06.034.
22. Wang Z., Gao S., You J., Yu J., Jiang T. Synthesis and application of water-soluble phenol-formaldehyde resin crosslinking agent. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Bangkok, March 10–12, 2017. pp. 012150. DOI: 10.1088/1755-1315/61/1/012150.
23. Sun Y., Fang Y., Chen A., You Q., Dai C., Cheng R., Liu Y. Gelation behavior study of a resorcinol–hexamethyleneteramine crosslinked polymer gel for water shut-off treatment in low temperature and high salinity reservoirs. *Energies*, 2017, vol. 10, pp. 913. DOI: 10.3390/EN10070913.
24. Zhu D., Hou J., Meng X., Zheng Z., Wei Q., Chen Y., Bai B. Effect of different phenolic compounds on performance of organically cross-linked terpolymer gel systems at extremely high temperatures. *Energy and Fuels*, 2017, vol. 31, pp. 8120–8130. DOI: 10.1021/ACS.ENERGYFUELS.7B01386.
25. Zhuang Y., Pandey S.N., McCool C.S., Willhite G.P. Permeability modification with sulfomethylated resorcinol-formaldehyde gel system. *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*, 2000, vol. 3, pp. 386–393. DOI: 10.2118/66045-PA.
26. Hutchins R.D., Dovan H.T., Sandiford B.B. Field applications of high temperature organic gels for water control. *Proceedings – SPE Symposium on Improved Oil Recovery*, 1996, vol. 2, pp. 419–426. DOI: 10.2118/35444-MS.
27. Tessarolli F.G.C., Souza S.T.S., Gomes A.S., Mansur C.R.E. Influence of polymer structure on the gelation kinetics and gel strength of acrylamide-based copolymers, bentonite and polyethylenimine systems for conformance control of oil reservoirs. *Journal of Applied Polymer Science*, 2019, vol. 136, pp. 47556. DOI: 10.1002/APP.47556.
28. Vasquez J., Jurado I., Santillan A., Hernandez R. Organically crosslinked polymer system for water reduction treatments in Mexico. *Society of Petroleum Engineers – 1st International Oil Conference and Exhibition*. Mexico, 31 August–2 September 2006. pp. 924–931. DOI: 10.2118/104134-MS.
29. Deolarte C., Vasquez J., Soriano E., Santillan A. Successful combination of an organically crosslinked polymer system and a rigid-setting material for conformance control in Mexico. *SPE Production & Operations*, 2009, vol. 24, pp. 522–529. DOI: 10.2118/112411-PA.
30. Choi S.K., Sharma M.M., Bryant S.L., Huh C. pH sensitive polymers for novel conformance control and polymerflood applications. *Proceedings – SPE International Symposium on Oilfield Chemistry*. Texas, April 20–22, 2009. pp. 758–780. DOI: 10.2118/121686-MS.
31. Eoff L., Dalrymple D., Everett D. Global field results of a polymeric gel system in conformance applications. *SPE Russian Oil and Gas Technical Conference and Exhibition*. Moscow, October 3–6, 2006. pp. 280–285. DOI: 10.2118/101822-MS.
32. Pu J., Geng J., Bai B. Effect of the chromium ion diffusion in polyacrylamide/chromium acetate gelation system with surrounding water on gelation behavior. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2018, vol. 171, pp. 1067–1076. DOI: 10.1016/J.PETROL.2018.08.014.
33. Al-Assi A.A., Willhite G.P., Green D.W., McCool C.S. Formation and propagation of gel aggregates using partially hydrolyzed polyacrylamide and aluminum citrate. *SPE Journal*, 2009, vol. 14, pp. 450–461. DOI: 10.2118/100049-PA.
34. Zhang H., Yang H., Zhou B., Li X., Zhao H., Wang F., Kang W., Sarsenbekuly B., Aidarova S., Gabdullin M. Effects of cyclodextrin polymer on the gelation of amphiphilic polymer in inclusion complex. *Journal of Molecular Liquids*, 2020, vol. 305, pp. 112850. DOI: 10.1016/J.MOLLIQ.2020.112850.
35. Nikitin M.N., Petukhov A.V. Gel-forming composition on sodium silicate base for water shutoff in complex structure fractured reservoir conditions. *Network journal Oil and Gas Business*, 2011, no. 5, pp. 143–153. (In Russ.) Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=17998412> (accessed 16 May 2024).
36. Moradi-Araghi A. A review of thermally stable gels for fluid diversion in petroleum production. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2000, vol. 26, pp. 1–10. DOI: 10.1016/S0920-4105(00)00015-2.
37. Zhang H., Yang H., Sarsenbekuly B., Zhang M., Jiang H., Kang W., Aidarova S. The advances of organic chromium based polymer gels and their application in improved oil recovery. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2020, vol. 282, pp. 102214. DOI: 10.1016/J.CIS.2020.102214.
38. Sydansk R.D. A newly developed chromium(III) gel technology. *SPE Reservoir Engineering*, 1990, vol. 5, pp. 346–352. DOI: 10.2118/19308-PA.

39. Lockhart T.P. Chemical properties of chromium/polyacrylamide gels. *SPE Advanced Technology Series. OnePetro*, Milan, 1994, vol. 2, pp. 199–205. DOI: 10.2118/20998-PA.
40. Yang H., Iqbal M.W., Lashari Z.A., Cao C., Tang X., Kang W. Experimental research on amphiphilic polymer/organic chromium gel for high salinity reservoirs. *Colloids Surf A Physicochem Eng Asp*, 2019, vol. 582, pp. 123900. DOI: 10.1016/J.COLSURFA.2019.123900.
41. Mumallah N.A. Chromium (III) propionate: a crosslinking agent for water-soluble polymers in hard oilfield brines. *SPE Reservoir Engineering*, 1988, vol. 3, pp. 243–250. DOI: 10.2118/15906-PA.
42. Zhang L., Khan N., Pu C. Influence of salinity on the properties of the different HPAM/Al³⁺ systems. *Oil & Gas Science and Technology – Revue d'IFP Energies Nouvelles*, 2019, vol. 74, pp. 37. DOI: 10.2516/OGST/2019011.
43. Sharma P., Kudapa V.K. Study on the effect of cross-linked gel polymer on water shutoff in oil wellbores. *Materials Today: Proceedings*, 2022, vol. 48, pp. 1103–1106. DOI: 10.1016/J.MATPR.2021.07.506.
44. Smith J.E. Performance of 18 polymers in aluminum citrate colloidal dispersion Gels. *SPE International Symposium on Oilfield Chemistry*. Texas, February 14–17, 1995. DOI: 10.2118/28989-MS.
45. Mack J.C., Smith J.E. In-depth colloidal dispersion gels improve oil recovery efficiency. *SPE/DOE Improved Oil Recovery Symposium*. Oklahoma, April 17–20, 1994. DOI: 10.2118/27780-MS.
46. Chang H.L., Sui X., Xiao L., Guo Z., Yao Y., Xiao Y., Chen G., Song K., Mack J.C. Successful field pilot of in-depth colloidal dispersion gel (CDG) technology in Daqing oil field. *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*, 2006, vol. 9, pp. 664–673. DOI: 10.2118/89460-PA.
47. Fielding R.C., Gibbons D.H., Legrand F.P. In-depth drive fluid diversion using an evolution of colloidal dispersion gels and new bulk gels: an operational case history of north rainbow ranch unit. *Proceedings - SPE Symposium on Improved Oil Recovery*, 1994, vol. 1, pp. 433–444. DOI: 10.2118/27773-MS.
48. Lu X., Song K., Niu J., Chen F. Performance and evaluation methods of colloidal dispersion gels in the daqing oil field. *Proceedings of the SPE Asia Pacific Conference on Integrated Modelling for Asset Management*. Yokohama, April 25–26, 2000. pp. 615–625. DOI: 10.2118/59466-MS.
49. Coste J.P., Liu Y., Bai B., Li Y., Shen P., Wang Z., Zhu G. In-depth fluid diversion by pre-gelled particles. laboratory study and pilot testing. *SPE/DOE Improved Oil Recovery Symposium*. Oklahoma, April 3–5, 2000. DOI: 10.2118/59362-MS.
50. Manrique E., Reyes S., Romero J., Aye N., Kiani M., North W., Thomas C., Kazempour M., Izadi M., Roostapour A. Colloidal dispersion gels (CDG): field projects review. *Society of Petroleum Engineers – SPE EOR Conference at Oil and Gas West Asia: Driving Integrated and Innovative EOR*. Oman, March 31–April 2, 2014. pp. 476–488. DOI: 10.2118/169705-MS.
51. Khamees T., Flori R. Investigating the propagation of the colloidal dispersion gel (CDG) in thick heterogeneous reservoirs using numerical simulation. *American Journal of Science, Engineering and Technology*, 2019, vol. 4, pp. 1–17. DOI: 10.11648/j.ajset.20190401.11.
52. Smith J.E., Liu H., Guo Z.D. Laboratory studies of in-depth colloidal dispersion gel technology for Daqing oil field. *SPE/AAPG Western Regional Meetings*. California, June 19–22, 2000. pp. 533–545. DOI: 10.2118/62610-MS.
53. Diaz D., Saez N., Cabrera M., Manrique E., Romero J., Kazempour M., Aye N. CDG in a heterogeneous fluvial reservoir in Argentina: pilot and field expansion evaluation. *Society of Petroleum Engineers – SPE Asia Pacific Enhanced Oil Recovery Conference*. Malaysia, August 11–13, 2015. pp. 1526–1538. DOI: 10.2118/174704-MS.
54. Nguyen M.P., Ponomarenko T., Nguyen N. Energy transition in Vietnam: a strategic analysis and forecast. *Sustainability*, 2024, vol. 16, pp. 1969. DOI: 10.3390/SU16051969.
55. Ranganathan R., Lewis R., McCool C.S., Green D.W., Willhite G.P. Experimental study of the gelation behavior of a polyacrylamide/aluminum citrate colloidal-dispersion gel System. *SPE Journal*, 1998, vol. 3, pp. 337–343. DOI: 10.2118/52503-PA.
56. Imqam A., Wang Z., Bai B. Preformed-particle-gel transport through heterogeneous void-space conduits. *SPE Journal*, 2017, vol. 22, pp. 1437–1447. DOI: 10.2118/179705-PA.
57. Sun X., Bai B. Dehydration of polyacrylamide-based super-absorbent polymer swollen in different concentrations of brine under CO₂ conditions. *Fuel*, 2017, vol. 210, pp. 32–40. DOI: 10.1016/J.FUEL.2017.08.047.
58. Bai B., Wei M., Liu Y. Field and lab experience with a successful preformed particle gel conformance control technology. *SPE Production and Operations Symposium, Proceedings*, 2013, pp. 506–522. DOI: 10.2118/164511-MS.
59. San J., Wang S., Yu J., Lee R., Liu N. Nanoparticle stabilized CO₂ foam: effect of different ions. *SPE – DOE Improved Oil Recovery Symposium Proceedings*. Oklahoma, April 11–13, 2016. DOI: 10.2118/179628-MS.
60. Bai B., Li L., Liu Y., Liu H., Wang Z., You C. Preformed particle gel for conformance control: factors affecting its properties and applications. *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*, 2007, vol. 10, pp. 415–422. DOI: 10.2118/89389-PA.
61. Bai B., Huan F., Liu Y., Seright R.S., Wang Y. Case study on preformed particle gel for in-depth fluid diversion. *Proceedings – SPE Symposium on Improved Oil Recovery*, 2008, vol. 3, pp. 1438–1455. DOI: 10.2118/113997-MS.
62. Wu W., Chen T., Wang X., Li L., Wu R., Zhang X. Synthesis and swelling behavior of a high temperature-resistant superabsorbent. *Journal of Polymer Materials*, 2015, vol. 32 Iss. 4, pp. 361.
63. Zhang X., Wang X., Li L., Zhang S., Wu R. Preparation and swelling behaviors of a high temperature resistant superabsorbent using tetraallylammonium chloride as crosslinking agent. *Reactive and Functional Polymers*, 2015, vol. 87, pp. 15–21. DOI: 10.1016/J.REACTFUNCTPOLYM.2014.12.006.
64. Kang W., Kang X., Lashari Z.A., Li Z., Zhou B., Yang H., Sarsenbekuly B., Aidarova S. Progress of polymer gels for conformance control in oilfield. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2021, vol. 289, pp. 102363. DOI: 10.1016/J.CIS.2021.102363.
65. Lenji M.A., Haghshenasfard M., Sefti M.V., Salehi M.B., Heidari A. Experimental study of swelling and rheological behavior of preformed particle gel used in water shutoff treatment. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2018, vol. 169, pp. 739–747. DOI: 10.1016/J.PETROL.2018.06.029.
66. Idilyatullin A.R. RITIN-10: new efficient reagent for enhanced oil recovery of reservoirs. *Oil industry*, 2007, no. 2, pp. 54–58. (In Russ.)

67. Galkin S.V., Rozhkova Y.A. Analysis of experience in the application of pre-cross-linked polymer gels in the development of high-watered production facilities in the conditions of low-temperature oil reservoirs. *Journal of Mining Institute*, 2024, vol. 265, pp. 55–64. (In Russ.)
68. Ketova Y.A., Bai B., Khizhnyak G.P., Gladkikh E.A., Galkin S. V. Testing of preformed particles polymer gel technology on core filtration models to limit water inflows. *Journal of Mining Institute*, 2020, vol. 241, pp. 91–96. (In Russ.) DOI: 10.31897/PMI.2020.1.91.
69. Sun D.V., Tananykhin D., Saychenko L. An environmental study on reorganizing the reservoir pressure maintenance system for western Siberia oil fields. *Ekoloji*, 2018, vol. 27, pp. 1175–1180.
70. Zaitoun A., Dupuis G. Conformance control using SMG microgels: laboratory evaluation and first field results. *Society of Petroleum Engineers – SPE Europec Featured at 79th EAGE Conference and Exhibition*, 2017, pp. 607–616. DOI: 10.2118/185864-MS.
71. Zaitoun A., Tabary R., Rousseau D., Pichery T., Nouyoux S., Mallo P., Braun O. Using microgels to shut off water in a gas storage well. *Proceedings – SPE International Symposium on Oilfield Chemistry*. France, June 12–15, 2017. pp. 221–228. DOI: 10.2118/106042-MS.
72. Qiu Y., Wei M., Bai B., Mao C. Data analysis and application guidelines for the microgel field applications. *Fuel*, 2017, vol. 210, pp. 557–568. DOI: 10.1016/J.FUEL.2017.08.094.
73. Goudarzi A., Almohsin A., Varavei A., Taksaudom P., Hosseini S.A., Delshad M., Bai B., Sepehrmoori K. New laboratory study and transport model implementation of microgels for conformance and mobility control purposes. *Fuel*, 2017, vol. 192, pp. 158–168. DOI: 10.1016/J.FUEL.2016.11.111.
74. Rozhkova Y.A., Burin D.A., Galkin S. V., Yang H. Review of microgels for enhanced oil recovery: properties and cases of application. *Gels*, 2022, vol. 8, pp. 112. DOI: 10.3390/GELS8020112.
75. Al-Ibadi A., Civan F. Experimental investigation and correlation of treatment in weak and high-permeability formations by use of gel particles. *SPE Production & Operations*, 2013, vol. 28, pp. 387–401. DOI: 10.2118/153557-PA.
76. Yang H., Kang W., Yu Y., Yin X., Wang P., Zhang X. A new approach to evaluate the particle growth and sedimentation of dispersed polymer microsphere profile control system based on multiple light scattering. *Powder Technol*, 2017, vol. 315, pp. 477–485. DOI: 10.1016/J.POWTEC.2017.04.001.
77. Inomata H., Wada N., Yagi Y., Goto S., Saito S. Swelling behaviours of N-alkylacrylamide gels in water: effects of copolymerization and crosslinking density. *Polymer*, 1995, vol. 36, pp. 875–877. DOI: 10.1016/0032-3861(95)93120-B.
78. Lashari Z.A., Yang H., Zhu Z., Tang X., Cao C., Iqbal M.W., Kang W. Experimental research of high strength thermally stable organic composite polymer gel. *Journal of Molecular Liquids*, 2018, vol. 263, pp. 118–124. DOI: 10.1016/J.MOLLIQ.2018.04.146.
79. Jiang J.F., Zhao Q., Lin M.Q., Wang, Y.F., Dang S.M., Sun F.F. A study of factors affecting properties of AM/AMPS/NVP terpolymeric microspheres prepared by inverse suspension polymerization. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2015, vol. 103. DOI: 10.1088/1757-899X/103/1/012046.
80. Yang H., Zhou B., Zhu T., Wang P., Zhang X., Wang, T., Wu, F., Zhang L., Kang W., Ketova Y.A. Conformance control mechanism of low elastic polymer microspheres in porous medium. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2021, vol. 196, pp. 107708. DOI: 10.1016/J.PETROL.2020.107708.
81. Zhang H., Liu H., Hong J., Liu J., Yang Y., Liu Z., Abdullah M.A., Yang H., Yu H., Feng X. Investigation into the flow mechanism of nano-elastic microspheres during water invasion. *Processes*, 2023, vol. 11, pp. 3342. DOI: 10.3390/PR11123342.
82. Lei G., Li L., Nasr-El-Din H.A. New gel aggregates to improve sweep efficiency during waterflooding. *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*, 2011, vol. 14, pp. 120–128. DOI: 10.2118/129960-PA.
83. Jia H., Ren Q., Pu W.F., Zhao J. Swelling mechanism investigation of microgel with double-cross-linking structures. *Energy and Fuels*, 2014, vol. 28, pp. 6735–6744. DOI: 10.1021/EF5012325.
84. Tang X., Kang W., Zhou B., Gao Y., Cao C., Guo S., Iqbal M.W., Yang H. Characteristics of composite microspheres for in-depth profile control in oilfields and the effects of polymerizable silica nanoparticles. *Powder Technol*, 2020, vol. 359, pp. 205–215. DOI: 10.1016/J.POWTEC.2019.09.070.
85. Brattekkås B., Steinsbo M., Graue A., Ferno M.A., Espedal H., Seright R.S. New insight into wormhole wormation in polymer gel during water chase floods with positron emission tomography. *SPE Journal*, 2017, vol. 22, pp. 32–40. DOI: 10.2118/180051-PA.
86. Seright R.S., Lane R.H., Sydansk R.D. A strategy for attacking excess water production. *SPE Production & Facilities*, 2003, vol. 18, pp. 158–169. DOI: 10.2118/84966-PA.
87. Khoshkar P.A., Fatemi M., Ghazanfari M.H. Static and dynamic evaluation of the effect of nanomaterials on the performance of a novel synthesized PPG for water shut-off and improved oil recovery in fractured reservoirs. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2020, vol. 189, pp. 107019. DOI: 10.1016/J.PETROL.2020.107019.

Information about the authors

Dmitry G. Podoprigora, Cand. Sc., Associate Professor, Head of the Department of Oil and Gas Fields Development and Exploitation, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, 2, 21st line of Vasilievsky Island, St Petersburg, 199106, Russian Federation. podoprigora_dg@pers.spmi.ru; <https://orcid.org/0000-0001-9481-5451>

Fransishko Dzhessika Markushina, Postgraduate Student, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, 2, 21st line of Vasilievsky Island, St Petersburg, 199106, Russian Federation. s233002@stud.spmi.ru; <https://orcid.org/0009-0004-4931-3881>

Received: 12.08.2024

Revised: 28.10.2024

Accepted: 21.04.2025

УДК 658.567.1
DOI: 10.18799/24131830/2025/7/4941
Шифр специальности ВАК: 1.6.21
Научная статья

Модифицированный нефтесорбент из свекловичного жома для очистки поверхностной воды от нефти

А.С. Мельникова[✉], Н.В. Кострюкова

Уфимский университет науки и технологий, Россия, г. Уфа

[✉]annamel7@mail.ru

Аннотация. Актуальность. Шестая и двенадцатая цели устойчивого развития направлены на обеспечение рационального использования водных ресурсов и поощрение ответственного потребления, производства, соответственно. В связи с активным развитием промышленности многие водные ресурсы подвержены антропогенным загрязнениям, особенно в результате разлива нефти. Проблема негативного влияния разливов нефти и нефтепродуктов на окружающую среду представляет угрозу для здоровья населения и устойчивости экосистем, а ее решение является актуальной темой не только для России, но и для мира в целом. В связи с этим растет спрос на экологичный и эффективный нефтесорбент с низкой стоимостью для ликвидации последствий разливов. Инновационным направлением, занимающим особую нишу, является разработка технологий создания и использования сорбционных материалов, изготовленных из растительных отходов агропромышленного комплекса. **Цель.** Анализ эффективности модификации свекловичного жома с использованием СВЧ-излучения и сравнение параметров полученного материала с коммерческими аналогами нефтесорбентов. **Методы.** Методика определения нефтеемкости и остаточной концентрации нефтепродуктов в воде с использованием оборудования «Концентратомер КН-2м». **Результаты и выводы.** Определены оптимальные параметры модификации материала, такие как размер гранул сырья и время обработки. В лабораторных условиях определены значения нефтеемкости полученного сорбента и коммерческих аналогов. По результатам экспериментов наибольшей нефтеемкостью обладает сорбент фирмы «Профсорб-Ультра». Нефтесорбент из модифицированного свекловичного жома имеет нефтеемкость 4,3 г/г, что немного выше, чем у сорбента фирмы Spill-Sorb. Определена остаточная концентрация нефти в воде после использования сорбентов. Наибольшая концентрация нефти после очистки была при использовании сорбентов «Профсорб-ультра» и «Профсорб Эко», что свидетельствует о низкой эффективности очистки. Эффективность очистки воды от нефти при использовании нефтесорбента из свекловичного жома достигла 84,55 %, что свидетельствует о высокой эффективности применения материала.

Ключевые слова: нефть, разливы нефти, сорбент, нефтесорбенты, ликвидация разливов нефти, свекловичный жом, СВЧ-излучение

Для цитирования: Мельникова А.С., Кострюкова Н.В. Модифицированный нефтесорбент из свекловичного жома для очистки поверхностной воды от нефти // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 7. – С. 97–106. DOI: 10.18799/24131830/2025/7/4941

UDC 658.567.1
DOI: 10.18799/24131830/2025/7/4941
Scientific paper

Modified oil sorbent from beet pulp for surface water purification from oil

A.S. Melnikova[✉], N.V. Kostryukova

Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russian Federation

[✉]annamel7@mail.ru

Abstract. Relevance. The sixth and twelfth Sustainable Development Goals are ensuring the rational use of water resources and promoting responsible consumption, production, respectively. Due to the active development of industry, many water

resources are subject to anthropogenic pollution, especially as a result of oil spill. The problem of the negative impact of oil and petroleum product spills on the environment poses a threat to public health and ecosystem sustainability, and its solution is an urgent topic not only for Russia, but also for the world as a whole. In this regard, there is a growing demand for an environmentally friendly and efficient low-cost oil sorbent to eliminate the consequences of spills. An innovative area that occupies a special niche is the development of technologies for the creation and use of sorption materials made from plant waste from the agro-industrial complex. **Aim.** Analysis of the effectiveness of beet pulp modification using microwave radiation and comparison of the parameters of the obtained material with commercial analogues of oil sorbents. **Methods.** A method for determining the oil capacity and residual concentration of petroleum products in water using the Concentrator KN-2m equipment. **Results and conclusions.** The authors have determined the optimal parameters of the material modification, such as the size of the granules of the raw material and the processing time. The values of the oil capacity of the obtained sorbent and commercial analogues were determined in laboratory conditions. According to the results of experiments, the sorbent of Profisorb-Ultra has the highest oil capacity. The oil sorbent from modified beet pulp has an oil capacity of 4.3 g/g, which is slightly higher than that of the sorbent from Spill-Sorb. The authors determined oil residual concentration in water after the use of sorbents. The highest oil concentration after purification was when using Profisorb-ultra and Profisorb Eco sorbents, which indicates a low purification efficiency. The efficiency of water purification from oil when using oilcake from beet pulp reached 84.55%, which indicates the high efficiency of the material.

Keywords: oil, oil spills, sorbents, oil sorbents, oil spill response, beet pulp, microwave radiation

For citation: Melnikova A.S., Kostryukova N.V. Modified oil sorbent from beet pulp for surface water purification from oil. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 7, pp. 97–106. DOI: 10.18799/24131830/2025/7/4941

Введение

Нефть и нефтепродукты являются одними из самых вредных загрязнителей окружающей среды на сегодняшний день. Экологические последствия разливов трудно предсказать, поскольку нефтяное загрязнение нарушает многие естественные процессы и взаимосвязи, приводит к деградации флоры, фауны и накапливается в биомассе [1]. Нефть является продуктом длительного распада и очень быстро покрывает поверхность вод плотным слоем нефтяной пленки, которая препятствует доступу воздуха и света. Основная опасность заключается в том, что нефтяные пары оказывают отравляющее действие на организм живых существ, а структура вещества крайне негативно отражается еще и на месте их обитания.

Разливы нефтепродуктов могут привести к серьезным экологическим проблемам, масштаб последствий зависит от степени загрязнения, физических и химических свойств разлитого нефтепродукта, условий окружающей среды, а также территориальных особенностей местности, на которой произошел разлив [2]. Разливы нефтепродуктов в значительной степени влияют на сельскохозяйственные культуры и водные организмы, так как в результате распространения нефтепродуктов в окружающей среде может произойти загрязнение грунтовых вод и водных объектов, что приведет к изоляции воздуха из-за препятствия диффузии кислорода и к гибели флоры и фауны объектов [3].

Углеводороды нефти представляют собой смесь простых и сложных углеводородов, в основном состоящих из углерода и водорода, а также содержащих некоторое количество азота, серы и кислорода [4]. Углеводороды подразделяются на четыре

основных категории: насыщенные, ароматические, асфальтены (фенолы, жирные кислоты, кетоны, эфиры и порфирины) и смолы (пиридины, хинолины, карбазолы, сульфиды и амиды) [5]. Они также содержат множество летучих соединений, таких как бензол, толуол, этилбензол и ксилол, а также некоторые токсичные соединения, включая полициклические ароматические углеводороды, которые связываются с почвенными компонентами и трудно поддаются деградации [6]. Их токсичность, мутагенный и канцерогенный характер, а также устойчивость в окружающей среде могут оказать негативное влияние на здоровье человека и экосистему, поэтому они рассматриваются как приоритетные загрязняющие вещества.

Существуют разные способы ликвидации разливов, в данной статье мы выделили три основных метода ликвидации аварийных разливов нефтепродуктов: физико-механический, химический и биологический [7, 8]. Каждый из этих методов имеет свои достоинства и недостатки, эффективность каждого подхода обычно зависит от многих факторов, таких как состав нефти, вязкость и объем, а также местоположение и погодные условия [9].

К физико-химическим методам можно отнести такие процессы, как сорбция/адсорбция, обратный осмос, микрофильтрация, мембранная фильтрация и пр. Диспергирование, электрокоагуляция, химическая коагуляция, сжигание, экстракция и др. способы относятся к химическому методу [10]. К биологическим методам очистки воды от нефтепродуктов относятся биоремедиация, фиторемедиация и ферментная обработка [11].

Преимуществами адсорбции являются низкие энергозатраты, простота в применении и высокая

эффективность удаления при относительно низких затратах [12]. На сегодняшний день существует множество разновидностей сорбирующих материалов с различными характеристиками и параметрами. Но большое внимание исследователей приковано к биосорбентам, так как они имеют возобновляемую сырьевую базу и низкую стоимость [13, 14]. Различные исследователи рассматривали в качестве сырьевой базой для производства биосорбентов органические отходы на растительной основе, поскольку эти материалы легкодоступны, имеют низкую стоимость, поддаются биологическому разложению и являются биосовместимыми с другим материалами. Одними из ярких представителей растительных отходов с высоким потенциалом вторичного использования является свекловичный жом.

Основным недостатком биосорбентов является низкая нефтеемкость, которая чаще всего обусловлена гидрофильными свойствами, поэтому они нуждаются в дополнительной модификации. Наиболее распространенным способом модификации является ацетилирование. Эта процедура превращает лигноцеллюлозные материалы из гидрофильных в гидрофобные путем замены некоторых их гидроксильных (–ОН) групп ацетильными (–СОСН₃) группами, которые являются гидрофобными [15]. Помимо этого, возможна модификация химическими реактивами для увеличения сорбционной емкости материала. Подобные модификации могут увеличить эффективность сорбции нефти, но использование химических реагентов для модификации способно внести вторичные загрязнения в окружающую среду при ликвидации нефтеразлива.

Целью данного исследования является анализ эффективности модификации свекловичного жома с использованием СВЧ-излучения и сравнение параметров полученного материала с параметрами коммерческих аналогов нефтесорбентов.

Объекты и методика исследования

Объекты исследования. Жом сахарной свеклы был собран на Чишминском сахарном заводе (Республика Башкортостан) в феврале 2022 г. В работе исследовано два вида свекловичного жома: сухой и влажный. Сухой свекловичный жом (ССЖ) был собран после жомосушильного барабана. Влажный свекловичный жом (ВСЖ) собран после шнековой установки на производстве. Экспериментально определена массовая доля влаги исходного сырья методом высушивания до постоянной массы согласно методике [16]. Влажность составила 2,77 и 77 % от массы сырья для сухого и влажного свекловичного жома.

Для сравнения эффективности полученного сорбента из свекловичного жома проанализирова-

ны наиболее известные коммерческие аналоги нефтесорбентов на основе природных материалов преимущественно российского производства. В качестве коммерческих аналогов рассматривались различные сорбенты: «НЕС» фирмы ОЗОН, «Профсорб Ультра», «Профсорб Эко» и «Spill-sorb». Физические характеристики исследуемых материалов представлены в табл. 1.

Таблица 1. Характеристики исследуемых нефтесорбентов

Table 1. Characteristics of the studied oil sorbents

Характеристика Characteristic	Название нефтесорбента/Oil sorbent name			
	«НЕС» NES	«Профсорб Ультра» Proforsorb Ultra	«Spill- Sorb» Spill- Sorb	«Профсорб Эко» Proforsorb Eco
Размер гранул, мм Granule size, mm	0,5–5,0	0,6–5,0	0,1–10,0	0,3–10,0
Насыпная плотность, г/м ³ Bulk density, kg/m ³	80–130	70–200	135–180	120–200
Влажность Humidity, %	11	до 15 to 15	9	9–20
Заявленная нефте- емкость, кг/кг Declared oil capaci- ty, kg/kg	6–8	8	9	7

Нефтесорбент «НЕС» фирмы ОЗОН представляет собой материал на основе природного алюмосиликата (вермикулит), гидрофобизированного по специальной технологии. Материал обладает гидрофобными и олеофильными по отношению к нефти и нефтепродуктам свойствами.

Нефтесорбент «Профсорб Ультра» произведен из природного минерала и применяется для сбора разливов различных технических жидкостей с поверхности земли и воды производственных территорий и цехов, а также в качестве фильтрующей загрузки для очистных сооружений и поддержания микроорганизмов в аэротенках.

Абсорбент «Spill-Sorb» – это материал на основе канадского торфяного сфагнового мха (Canadian Sphagnum Peat moss).

Нефтесорбент «Профсорб Эко» – это материал на основе торфяного сфагнового мха, предназначенный для сбора нефтепродуктов на различных поверхностях.

Нефть для испытаний отобрана с одного из нефтеперерабатывающих заводов Республики Башкортостан (Российская Федерация), на одном из участков нефтепровода Усть-Балык–Курган–Уфа–Альметьевск (УБКУА) ПАО «Транснефть». Вязкость нефти при перекачке в холодное время года равна 0,25 см/с, плотность нефти – 850 кг/м³, среднее содержание серы в нефти – 1,5 %, парафина –

около 2 %. Средняя температура перекачиваемой нефти в зимние месяцы составляет 11,4 °С, в летние месяцы – 18,7 °С.

Модификация свекловичного жома. Модификация свекловичного жома в данном исследовании производилась с использованием СВЧ-излучения. Микроволновое излучение обычно определяется как часть электромагнитного спектра с длинами волн от 1 мм до 1 м (или эквивалентный диапазон частот от 300 МГц до 300 ГГц), расположенная между диапазонами радиоволн и инфракрасного излучения. Расширение пор в структуре материала происходит за счет высокоскоростного нагрева. Для проведения исследований использовалась СВЧ-печь с характеристиками: микроволны 1000 Вт; выходная мощность 700 Вт и 2450 МГц. Материал подвергали СВЧ-излучению в течение различных промежутков времени – от 5 до 30 минут.

Перед СВЧ-обработкой влажный свекловичный жом измельчали с использованием измельчителя NOTTER.

Сухой свекловичный жом подвергался предварительной стадии подготовки сырья, которая заключается в замачивании в дистиллированной воде на протяжении 20 минут. Это необходимо, так как дальнейшая модификация предполагает обработку СВЧ-излучением, суть которого заключается в воздействии электромагнитного излучения дециметрового диапазона на водосодержащий материал. После замачивания материал отжимали руками и подвергали СВЧ-обработке. Так как обработка в лабораторных условиях предусматривает использование малого количества материала, его влажность после ручного отжатия была примерно одинаковой (отклонение около 10 %).

Методика определения нефтеемкости. Процедура определения нефтеемкости включала в себя несколько операций: на чистую сетку в один слой помещали некоторое количество сорбента, сетку с сорбентом взвешивали для вычисления массы анализируемого сорбента (M1). Далее сетку с сорбентом погружали в нефть или нефтепродукт, выдерживали в ней в течение 10–15 минут, после чего избытку нефти давали стечь, а сетку с насыщенным сорбентом взвешивали (M2). Масса нефти, поглощенной сорбентом, вычислялась как разница между M1 и M2. Величину нефтеёмкости вычисляли как отношение массы нефти, поглощенной сорбентом, к массе сорбента [17]. Измерение проводилось три раза, и вычислялось среднее значение нефтеёмкости.

Подобную методику определения нефтеемкости использовали авторы исследования [18], в котором в качестве сорбирующего материала применялись polypropylene pads. Определение нефтеемкости проводилось в статических условиях.

Методика измерения остаточной концентрации нефти в воде. Для анализа эффективности очистки воды при использовании нефтесорбентов проведены исследования по измерению остаточной концентрации нефти в воде. Измерение остаточной концентрации нефти в воде проходило с использованием оборудования «Концентратомер КН-2м». В основу работы прибора анализатора нефтепродуктов положен фотометрический метод определения нефтепродуктов, жиров и НПАВ в четыреххлористом углероде в инфракрасной области спектра на длине волны 3,42 микрометра.

Для анализа пробы проведены процедуры подготовки реактивов и оборудования. Анализ проб производился в соответствии с [19]: полученную пробу фильтровали через четыре слоя марли и переносили в делительную воронку. В делительную воронку с пробой добавляли 1 мл серной кислоты, чтобы создать кислую среду до pH 2. Далее добавляли 40 г натрия хлористого и 10 мл четыреххлористого углерода. Пробу перемешивали в течение 5 минут на скорости 2500 оборотов в минуту, после проба отстаивалась на протяжении 10 минут. Потом добавляли 2 г натрия сернокислого на 10 мл элюата, и через 10 минут пробу переносили в концентратомер, и проводили измерения.

Массовую концентрацию нефтепродуктов в пробе воды, X, мг/дм³, рассчитывали по формуле:

$$X = \frac{X_{\text{изм}} \cdot V_{\text{ЭК}} \cdot K}{V} - X_{\text{хол}},$$

где X_{изм} – результат измерений массовой концентрации нефтепродуктов в элюате на концентратомере, мг/дм³; V_{ЭК} – объём четыреххлористого углерода, использованного для проведения экстракции (V_{ЭК}=30 см³); K – коэффициент разбавления, т. е. соотношение объёмов мерной колбы и аликвоты элюата; V – объём пробы анализируемой воды, см³; X_{хол} – результат измерений массовой концентрации нефтепродуктов в холостой пробе, мг/дм³.

Результаты исследования и их обсуждение

Подбор оптимальных условий модификации. Оптимальные условия получения нефтесорбента зависят от параметров исходного сырья и времени обработки. Для достижения высокой эффективности сорбции готового нефтесорбента необходимо провести исследования по подбору оптимальных условий модификации свекловичного жома.

Предварительно сухой свекловичный жом был просеян через сита разных размеров, в результате было получено три вида фракций:

- 1) большие фракции – размер гранул 2–1 см;
- 2) средние фракции – размер гранул 1–0,4 см;
- 3) мелкие фракции – размер гранул 0,4–0,2 см.

Важной характеристикой нефтесорбентов является нефтеёмкость – показатель того, сколько

грамм нефти может впитать один грамм сорбента. Поэтому для определения наиболее перспективного размера фракций для дальнейшей модификации была определена нефтеемкость материала. При определении нефтеемкости проводилось три параллельных опыта, результаты по измерениям представлены в табл. 2.

Таблица 2. Результаты определения нефтеемкости (г/г) в зависимости от размера гранул свекловичного жома

Table 2. Results of determination of oil capacity depending on the size of beet pulp granules

№ опыта Experience no.	Размер гранул свекловичного жома, см Beet pulp granule size, cm			
	Смешанный Mixed (2–0,2)	Крупный Large (2–1)	Средний Medium (1–0,4)	Мелкий Small (0,4–0,2)
1	2,01	1,27	1,92	2,75
2	2,11	1,12	1,97	2,73
3	2,20	1,17	1,95	2,81
Итого Total	2,11	1,19	1,95	2,76

Важным фактором для сорбционной способности является удельная поверхность материала. Площадь поверхности сферических частиц меняется в квадратичной зависимости от их размера, а объём – в кубической. Результаты, полученные эмпирическим путем (табл. 2), соотносятся с теоретическими данными, поэтому наиболее перспективным размером фракции для дальнейшей модификации является свекловичный жом с размером гранул 0,4–0,2 см. Было принято решение для дальнейшей модификации использовать сухой и влажный свекловичный жом с размером фракций 0,4–0,2 см.

Обработка сырья СВЧ-излучением проводилась при разном времени облучения – 5, 10, 20, 30 минут при толщине слоя около 0,5 см. При СВЧ-облучении на протяжении 5 и 10 минут ВСЖ имел высокий процент влажности, что препятствовало сорбции нефти.

С увеличением времени обработки СВЧ-излучения (до 30 минут) материал (сухой и отжатый свекловичный жом) приобретал золотистый и коричневый цвет. Для понимания того, как увеличение времени обработки сказывается на сорбирующей способности материала, проведены измерения параметра нефтеемкости образцов темно-коричневого и светлого цвета ВСЖ, результаты представлены в табл. 3.

СВЧ-обработка может вызывать структурные изменения в жоме, такие как дегидратация, модификация поверхности и изменение молекулярной структуры полисахаридов, что, в свою очередь, может влиять на его способность к адсорбции и

десорбции загрязняющих веществ. В результате анализа данных табл. 3 можно сделать вывод о том, что при обработке более 30 мин происходит деструкция жома сахарной свеклы, это видно по изменению цвета, в результате длительной СВЧ-обработки нефтеемкость материала уменьшается. Поэтому оптимальным временем обработки материала СВЧ-излучением является 20 минут.

Таблица 3. Результаты определения нефтеемкости (г/г) образцов свекловичного жома при длительной СВЧ-обработке

Table 3. Results of determining the oil capacity of beet pulp samples during long-term microwave processing

Проба материала Material sample	Слой Layer	Размер гранул, см Granule size, cm	Опыт/Experiment			Итого Result
			1	2	3	
Темно-коричневый Dark brown	1 слой/layer (0,5 см/см)	0,4–0,7	1,77	1,75	1,76	1,77
Светлый Light			2,29	2,60	2,75	2,55

Для определения эффективности модификации свекловичного жома исследована сорбционная емкость материала по отношению к нефти до и после СВЧ-излучения, полученные результаты представлены на рис. 1.

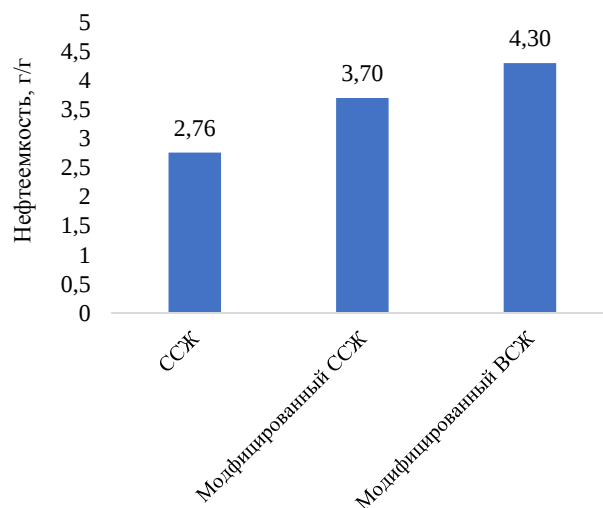


Рис. 1. Результаты определения нефтеемкости образцов свекловичного жома

Fig. 1. Results of determination of oil capacity of beet pulp samples

Согласно полученным результатам, можно сделать вывод о том, что модификация является эф-

фективной, так как нефтеемкость модифицированного ССЖ увеличилась на 25 %. Наибольшую нефтеемкость продемонстрировал модифицированный ВСЖ, поэтому было принято решение использовать ВСЖ с размером гранул 0,4–0,2 см, подверженный СВЧ-излучению на протяжении 20 минут для дальнейшего исследования.

Результаты определения нефтеемкости. Для того чтобы понять, насколько полученный сорбент является конкурентоспособным, произведено сравнение нефтеемкости коммерческих аналогов, представленных на рынке на сегодняшний день. В качестве коммерческих аналогов рассматривались сорбенты «НЕС» фирмы ОЗОН (материал на основе природного алюмосиликата); «Профсорб Ультра» (на основе природного минерала); «Профсорб Эко» (на основе торфяного сфагнового мха) и «Spill-sorb» (на основе канадского сфагнового мха). Результаты определения нефтеемкости представлены на рис. 2.

Согласно данным рис. 2, можно сделать вывод о том, что полученный сорбент является достойной альтернативой коммерческим аналогам, представленным на рынке. Также следует отметить, что заявленные параметры нефтеемкости коммерческих сорбентов не соответствуют фактическим значениям. Это может быть связано с тем, что для измерения нефтеемкости использовались разные методики. Для оценки объективной нефтеемкости материалов произведен литературный анализ материалов, из которых сделаны коммерческие сорбенты, исследуемые в этой работе.

В исследование [20] рассматривали модификацию вермикулита с использованием реактивов (метилсиликонат натрия, эмульсия на основе алкилсиликонатов щелочных металлов и олигометилгид-

ридсилоксан (Пента-804) линейного строения в сочетании с уайт-спиритом и этиловым спиртом), нефтеемкость материала зависела от обработки и варьировалась от 5,4 до 5,8 г/г. Нефтеемкость термоактивированного вермикулитового сорбента в газовой среде составила 5,4 г/г. Наибольший показатель нефтеемкости (5,8 г/г) был зафиксирован при обработке материала олигометилгидридсилоксаном (Пента-804) в сочетании с этиловым спиртом. Исходя из этих фактов можно сделать вывод, что значения нефтеемкости соотносятся. Следует отметить, что авторы использовали ту же методику для определения нефтеемкости, в качестве нефтепродукта использовалась нефть сырая Приразломного месторождения. Исходя из представленных данных, можно сделать вывод, что полученные значения нефтеемкости являются объективными.

В исследование [21] определена нефтеемкость натуральных нефтесорбентов на основе торфа, шерсти, мха и соломы. В качестве нефтепродукта использовалась нефть с плотностью 869 кг/м³ и дизельное топливо. Нефтеемкость определяли с использованием гравиметрического метода анализа, время контакта составило 2 минуты. Нефтеемкость торфа по отношению к нефти составила 7,071 г/г, а нефтеемкость мха – 8,985 г/г. Следует отметить, что нефтеемкость абсорбента Spill-Sorb на основе канадского торфяного сфагнового мха в результате исследования равна 4,28 г/г, а нефтеемкость сорбента «Профсорб Эко» на основе торфяного сфагнового мха – 4,15 г/г. Различия результатов определения нефтеемкости в текущей работе могут быть связаны с разным значением плотности используемой нефти, а также с различиями в процедуре определения нефтеемкости.

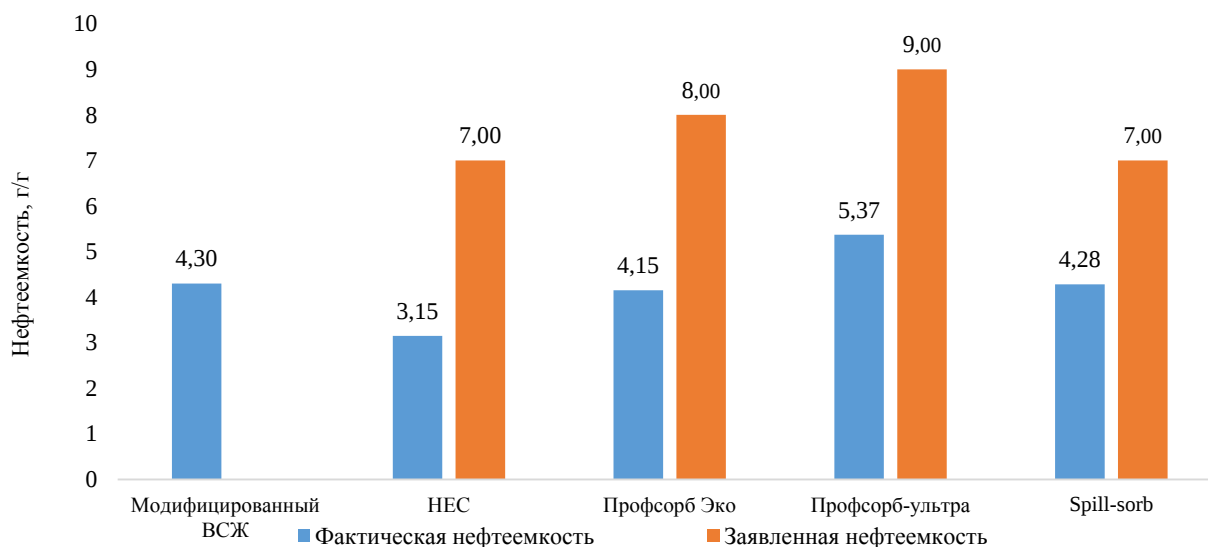


Рис. 2. Результаты определения нефтеемкости сорбентов

Fig. 2. Results of determining the oil capacity of sorbents

Авторы статьи [22] определили сорбционную способность мха по отношению к нефти согласно стандартному методу испытаний сорбирующих характеристик адсорбентов (ASTM F726-12). В результате исследования сорбционная способность мха по отношению к нефти составила 7,36 г/г. Разность значений между полученными нами данными и данными, представленными в статье, может быть связана с использованием различных методик определения нефтеемкости и разными характеристиками сорбирующего материала (мха).

Результаты определения остаточной концентрации нефти в воде. Наряду с сорбционной емкостью как количественного критерия максимального поглощения загрязняющего вещества сорбентом важным критерием эффективности работы сорбента для ликвидации разлива нефти на воде является остаточная концентрация нефти в воде после применения.

Для анализа эффективности нефтесорбентов был смоделирован разлив нефти на воде в лабораторных условиях. В емкость была налита дистиллированная вода объемом 5,0 л, температура воды составляла примерно 4 °С. Далее было добавлено 5,0 г нефти, таким образом начальная концентрация нефти равна 100 мг/л.

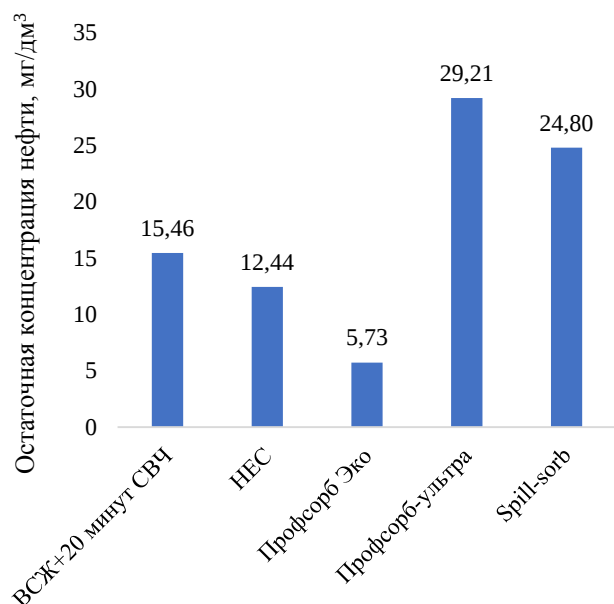


Рис. 3. Результаты определения остаточной концентрации нефти в воде после использования нефтесорбентов «НЕС» фирмы ОЗОН

Fig. 3. Results of determining oil residual concentration in water after the use of oil sorbents

На нефтяное пятно было добавлено 2,5 г нефтесорбента. Сорбент на нефтяном пятне оставался

около 7–10 минут до полной сорбции. После сорбции отработанный нефтесорбент отбирали ситечком. После очистки воды от отработанного сорбента воду перемешивали стеклянной палочкой в течение минуты для распределения остаточной концентрации нефти. Из полученной воды отбирали три пробы по 1,0 л. Эксперименты проводились в статических условиях. На рис. 3 представлены результаты определения остаточной концентрации нефти в воде после использования различных нефтесорбентов. Эти данные получены при расчете средней арифметической концентрации трех проб.

Наибольшая эффективность очистки воды от нефти зафиксирована при использовании сорбента «Spill-Sorb», она составила 94,27 %, эффективность очистки сорбента «НЕС» – 87,66 %, а модифицированного свекловичного жома – 84,55 %.

Интересным фактом является то, что эффективность очистки воды при использовании сорбента «Профсорб Ультра» намного ниже, чем у сорбента «Spill-Sorb», хотя оба сорбента изготовлены из вермикулита. Это связано с тем, что материалы изготовлены по разным технологиям с различными процедурами модификациями.

В исследовании [21] авторы изучали модификацию вермикулита с использованием реактивов, помимо параметра нефтеемкости они также изучали эффективность адсорбции дизельного топлива с поверхности воды. Для анализа проб использовали подобное оборудование, что использовалось и в данном исследовании (анализатор нефтепродуктов АН-2). Эффективность очистки воды от дизельного топлива варьировалась от 68,56 до 96,88 % в зависимости от обработки материала. Наиболее высокая эффективность очистки была достигнута при использовании вермикулита, обработанного олигометилгидридсилоксаном (Пента-804), она составила 96,88 %. Эффективность очистки воды при использовании термоактивированного вермикулита составила 68,56 %. Сопоставление полученных нами результатов с литературными данными демонстрирует их согласованность и подтверждает достоверность эксперимента.

Заключение

В результате исследования определены оптимальные параметры модификации свекловичного жома в лабораторных условиях. В ходе экспериментов выявлено, что наилучшими условиями модификации является использование отжатого свекловичного жома в качестве исходного сырья с размером гранул 0,4–0,2 см при обработке СВЧ-излучением на протяжении 20 минут.

Также в лабораторных условиях определили нефтеемкость полученного сорбента и коммерческих аналогов с использованием гравиметрическо-

го метода анализа. По результатам экспериментов наибольшей нефтеемкостью обладает сорбент фирмы «Профсорб Ультра». Нефтесорбент из модифицированного свекловичного жома является конкурентоспособным по сравнению с другими сорбентами, его нефтеемкость составила 4,30 г/г, примерно такой же результат был у сорбента фирмы «Spill-Sorb» (4,28 г/г).

Определена остаточная концентрация нефти в воде после использования сорбентов. Наибольшая концентрация нефти после очистки была при ис-

пользовании сорбентов «Профсорб Ультра» и «Spill-Sorb», что свидетельствует о низкой эффективности очистки. Эффективность очистки воды от нефти при использовании нефтесорбента из свекловичного жома достигла 84,55 %, что свидетельствует о высокой эффективности применения материала.

Исходя из вышесказанного, можно сделать вывод, что модифицированный свекловичный жом является достойным конкурентом коммерческим сорбентам, используемым в настоящее время при ликвидации нефтезагрязнения с поверхности воды.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Othumpangat S., Castranova V. Oil spills // *Encyclopedia of Toxicology*. – 2014. – P. 677–681. DOI: 10.1016/B978-0-12-386454-3.00359-6.
2. Multi-criteria analysis of different approaches to protect the marine and coastal environment from oil spills / A. Zafirakou, S. Themeli, E. Tsami, G. Aretoulis // *Journal of Marine Science and Engineering*. – 2018. – Vol. 6. – № 4. – P. 125. DOI: 10.3390/jmse6040125.
3. Removal of heavy crude oil from water surfaces using a magnetic inorganic-organic hybrid powder and membrane system / G. Costa Cunha, N.C. Pinho, I.A.A. Silva, L.S. Silva, J.A.S. Costa, C.M. Silva, L.P. Romao // *Journal Environmental Management*. – 2019. – Vol. 247. – P. 9–18. DOI: 10.1016/j.jenvman.2019.06.050.
4. Application of bioremediation technology in the environment contaminated with petroleum hydrocarbon / S. Chandra, R. Sharma, K. Singh, A. Sharma // *Annals of microbiology*. – 2013. – Vol. 63. – № 2. – P. 417–431. DOI: 10.1007/s13213-012-0543-3.
5. Adeniji A.O., Okoh O.O., Okoh A.I. Petroleum hydrocarbon profiles of water and sediment of Algoa Bay, Eastern Cape, South Africa // *International Journal of Environmental Research and Public Health*. – 2017. – Vol. 14. – № 10. – P. 1263. DOI: 10.3390/ijerph14101263.
6. Concentration and isotopic composition of dissolved Pb in surface waters of the modern global ocean / P. Pinedo-González, A.J. West, A. Tovar-Sanchez, C.M. Duarte, S.A. Sañudo-Wilhelmy // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 2018. – Vol. 235. – P. 41–54. DOI: 10.1016/j.gca.2018.05.005.
7. Akpomie K.G., Conradie J. Enhanced surface properties, hydrophobicity, and sorption behavior of ZnO nanoparticle-impregnated biomass support for oil spill treatment // *Environmental Science and Pollution Research*. – 2021. – Vol. 28. – № 20. – P. 25283–25299. DOI: 10.1007/s11356-021-12451-6.
8. Kundu P., Mishra I.M. Treatment and reclamation of hydrocarbon-bearing oily wastewater as a hazardous pollutant by different processes and technologies: a state-of-the-art review // *Reviews in Chemical Engineering*. – 2019. – Vol. 35. – № 1. – P. 73–108. DOI: 10.1515/revce-2017-0025.
9. Al-Majed A.A., Adebayo A.R., Hossain M.E. A sustainable approach to controlling oil spills. *Journal Environmental Management*. – 2012. – Vol. 113. – P. 213–227. DOI: 10.1016/j.jenvman.2012.07.034.
10. Vibhute A.M., Muvvala V., Sureshan K.M. A sugar-based gelator for marine oil-spill recovery // *Angewandte Chemie International Edition*. – 2016. – Vol. 55. – № 27. – P. 7782–7785. DOI: 10.1002/anie.201510308.
11. Adsorption of crude oil from aqueous solution: a review / E.C. Emenike, J. Adeleke, K.O. Iwuozor, S. Ogunniyi, C.A. Adeyanju, V.T. Amusa, H.K. Okoro, A.G. Adeniyi // *Journal of Water Process Engineering*. – 2022. – Vol. 50. – P. 103330. DOI: 10.1016/j.jwpe.2022.103330.
12. Cost of adsorbent preparation and usage in wastewater treatment: a review / J.O. Ighalo, F.O. Omoarukhe, V.E. Ojukwu, K.O. Iwuozor, C.A. Igwegbe // *Cleaner, Chem. Eng.* – 2022. – Vol. 3. – P. 100042. DOI: 10.1016/j.clce.2022.100042.
13. Кострюкова Н.В., Мельникова А.С., Платонова А.М. Анализ сорбирующих характеристик модифицированного отхода сахарного производства // *Вестник НЦБЖД*. – 2022. – № 3 (53). – С. 108–116.
14. Оценка сорбционных свойств листового опада урбанизированной территории (на примере центрального района города Уфа) / Э.С. Насырова, Н.А. Кальсин, Н.В. Кострюкова, Д.С. Султанова // *Успехи современного естествознания*. – 2024. – № 3. – С. 52–57.
15. Thermodynamic pathway of lignocellulosic acetylation process / J.C. Onwuka, E.B. Agbaji, V.O. Ajibola, F.G. Okibe // *BMC Chem.* – 2019. – Vol. 13. – № 1. – P. 1–11. DOI: 10.1186/s13065-019-0593-8.
16. Репкин Г.И., Исаева В.А. Лабораторный практикум по дисциплине «Технологии пищевых производств». – Иваново: Ивановский государственный химико-технологический университет, 2010. – 76 с.
17. Каменщиков Ф.А., Богомолов Е.И. Нефтяные сорбенты = Oil sorbent products. – М.; Ижевск: Регулярная и хаотическая динамика, 2005. – 268 с.
18. Kim H., Song Y., Lee H. Applicability of oil adsorption pads based on properties of very-low sulfur fuel oil: implications for oil spill remediation in a marine environment // *Marine Pollution Bulletin*. – 2023. – Vol. 192. – № 12. – P. 115006. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2023.115006.
19. ПНД Ф 14.1.272-2012 (ФР.1.31.2008.04409) «Методика измерений массовой концентрации нефтепродуктов в сточных водах методом ИК-спектрофотометрии с применением концентратометров серии КН». – М., 2012. – 24 с.
20. Губкина Т.Г., Беляевский А.Т., Маслобоев В.А. Способы получения гидрофобных сорбентов нефти модификацией поверхности вермикулита органосилоксанами // *Вестник МГТУ*. – 2011. – Т. 14. – Вып. 4. – С. 767–773.

21. Paulauskiene T. Ecologically friendly ways to clean up oil spills in harbor water areas: crude oil and diesel sorption behavior of natural sorbents // *Environmental science and pollution research international*. – 2018. – Vol. 25. – №. 1. – P. 9981–9991. DOI: 10.1007/s11356-018-1316-8.
22. Anuzyte E., Vaisis V. Natural oil sorbents modification methods for hydrophobicity improvement // *Energy Procedia*. – 2018. – Vol. 147. – P. 295–300. DOI: 10.1016/j.egypro.2018.07.095.

Информация об авторах

Анна Сергеевна Мельникова, аспирант, Уфимский университет науки и технологий, Россия, 450076, г. Уфа, ул. Заки Валиди, 32; annamel7@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0016-3005>

Наталья Викторовна Кострюкова, кандидат химических наук, доцент кафедры безопасности производства и промышленная экология, Уфимский университет науки и технологий, Россия, 450076, г. Уфа, ул. Заки Валиди, дом 32; kostrukova@list.ru; <https://orcid.org/0000-0001-5251-1054>

Поступила в редакцию: 03.07.2024

Поступила после рецензирования: 25.09.2024

Принята к публикации: 21.04.2025

REFERENCES

1. Othumpangat S., Castranova V. Oil spills. *Encyclopedia of Toxicology*, 2014, pp. 677–681. DOI: 10.1016/B978-0-12-386454-3.00359-6.
2. Zafirakou A., Themeli S., Tsami E., Aretoulis G. Multi-criteria analysis of different approaches to protect the marine and coastal environment from oil spills. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2018, vol. 6, no. 4, pp. 125. DOI:10.3390/jmse6040125.
3. Costa Cunha G., Pinho N.C., Silva I.A.A., Silva L.S., Costa J.A.S., Silva C.M., Romao L.P. Removal of heavy crude oil from water surfaces using a magnetic inorganic-organic hybrid powder and membrane system. *Journal Environmental Management*, 2019, vol. 247, pp. 9–18. DOI: 10.1016/j.jenvman.2019.06.050.
4. Chandra S., Sharma R., Singh K., Sharma A. Application of bioremediation technology in the environment contaminated with petroleum hydrocarbon. *Annals of microbiology*, 2013, vol. 63, no. 2, pp. 417–431. DOI: 10.1007/s13213-012-0543-3.
5. Adeniji A.O., Okoh O.O., Okoh A.I. Petroleum hydrocarbon profiles of water and sediment of Algoa Bay, Eastern Cape, South Africa. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2017, vol. 14, no. 10, pp. 1263. DOI: 10.3390/ijerph14101263.
6. Pinedo-González P., West A.J., Tovar-Sanchez A., Duarte C.M., Sañudo-Wilhelmy S.A. Concentration and isotopic composition of dissolved Pb in surface waters of the modern global ocean. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2018, vol. 235, pp. 41–54. DOI: 10.1016/j.gca.2018.05.005.
7. Akpomie K.G., Conradie J. Enhanced surface properties, hydrophobicity, and sorption behavior of ZnO nanoparticle-impregnated biomass support for oil spill treatment. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, vol. 28, no. 20, pp. 25283–25299. DOI: 10.1007/s11356-021-12451-6.
8. Kundu P., Mishra I.M. Treatment and reclamation of hydrocarbon-bearing oily wastewater as a hazardous pollutant by different processes and technologies: a state-of-the-art review. *Reviews in Chemical Engineering*, 2019, vol. 35, no. 1, pp. 73–108. DOI: 10.1515/revce-2017-0025.
9. Al-Majed A.A., Adebayo A.R., Hossain M.E. A sustainable approach to controlling oil spills. *Journal Environmental Management*, 2012, vol. 113, pp. 213–227. DOI: 10.1016/j.jenvman.2012.07.034.
10. Vibhute A.M., Muvvala V., Sureshan K.M. A sugar-based gelator for marine oil-spill recovery. *Angewandte Chemie International Edition*, 2016, vol. 55, no. 27, pp. 7782–7785. DOI: 10.1002/anie.201510308.
11. Emenike E.C., Adeleke J., Iwuzor K.O., Ogunniyi S., Adeyanju C.A., Amusa V.T., Okoro H.K., Adeniyi A.G. Adsorption of crude oil from aqueous solution: a review. *Journal of Water Process Engineering*, 2022, vol. 50, pp. 103330. DOI: 10.1016/j.jwpe.2022.103330.
12. Ighalo J.O., Omoarukhe F.O., Ojukwu V.E., Iwuzor K.O., Igwegbe C.A. Cost of adsorbent preparation and usage in wastewater treatment: a review. *Cleaner, Chem. Eng.*, 2022, vol. 3, pp. 100042. DOI: 10.1016/j.clce.2022.100042.
13. Kostryukova N.V., Melnikova A.S., Platonova A.M. Analysis of sorbing characteristics of modified sugar production waste. *Vestnik NCBŽD*, 2022, no. 3 (53), pp. 108–116. (In Russ.)
14. Nasyrova E.S., Kalsin N.A., Kostyukova N.V., Sultanova D.S. Assessment of sorption properties of leaf litter of an urbanized territory (on the example of the central district of Ufa). *Successes of modern natural science*, 2024, no. 3, pp. 52–57. (In Russ.)
15. Onwuka J.C., Agbaji E.B., Ajibola V.O., Okibe F.G. Thermodynamic pathway of lignocellulosic acetylation process. *BMC Chem*, 2019, vol. 13, no. 1, pp. 1–11. DOI: 10.1186/s13065-019-0593-8.
16. Repkin G.I., Isaeva V.A. *Laboratory workshop on the discipline «Technologies of food production»*. Ivanovo, Ivanovo State University of Chemical Technology Publ., 2010. 76 p. (In Russ.)
17. Kamenshchikov F.A., Bogomolny E.I. *Oil sorbents = Oil sorbent products*. Moscow, Izhevsk, Regular and chaotic dynamics Publ., 2005. 268 p. (In Russ.)
18. Kim H., Song Y., Lee H. Applicability of oil adsorption pads based on properties of very-low sulfur fuel oil: Implications for oil spill remediation in a marine environment. *Marine Pollution Bulletin*, 2023, vol. 192, no. 12, pp. 115006. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2023.115006.
19. *Environmental regulatory document of the federal level 14.1.272-2012 ((FR.1.31.2008.04409) «The method of measuring the mass concentration of petroleum products in wastewater by IR spectrophotometry using concentration meters of the KN series»*. Moscow, 2012. 24 p. (In Russ.)

20. Gubkina T.G., Belyaevsky A.T., Masloboev V.A. Methods of obtaining hydrophobic oil sorbents by modifying the surface of vermiculite with organosiloxanes. *Vestnik MGTU*, 2011, vol. 14, Iss. 4, pp. 767–773. (In Russ.)
21. Paulauskiene T. Ecologically friendly ways to clean up oil spills in harbor water areas: crude oil and diesel sorption behavior of natural sorbents. *Environmental science and pollution research international*, 2018, vol. 25, no. 1, pp. 9981–9991. DOI: 10.1007/s11356-018-1316-8.
22. Anuzyte E., Vaisis V. Natural oil sorbents modification methods for hydrophobicity improvement. *Energy Procedia*, 2018, vol. 147, pp. 295–300. DOI: 10.1016/j.egypro.2018.07.095.

Information about the authors

Anna S. Melnikova, Postgraduate Student, Ufa University of Science and Technology, 32, Zaki Validi street, Ufa, 450076, Russian Federation; annamel7@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0016-3005>

Natalia V. Kostryukova, Cand. Sc., Associate Professor, Ufa University of Science and Technology, 32, Zaki Validi street, Ufa, 450076, Russian Federation; kostrukova@list.ru; <https://orcid.org/0000-0001-5251-1054>

Received: 03.07.2024

Revised: 25.09.2024

Accepted: 21.04.2025

УДК 546.05:546.881
DOI: 10.18799/24131830/2025/7/4728
Шифр специальности ВАК: 1.5.15
Научная статья

Исследование процесса кислотно-восстановительного выщелачивания ванадия из летучей золы ТЭЦ

И.В. Мишин✉, А.В. Нистратов, Р.Д. Пичугов

Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Россия, г. Москва

✉chem.igor5@gmail.com

Аннотация. Актуальность. Ввиду более высокого начального содержания ванадия во вторичных источниках по сравнению с рудными месторождениями его извлечение из первых представляется более рентабельным и ресурсосберегающим процессом. Летучая зола сжигания жидкого топлива, содержащая 1,9 мас. % ванадия, может рассматриваться как вторичный источник этого металла, востребованного в производстве высокопрочных сплавов, катализаторов, электролитов в проточных батареях. Достаточно полное извлечение и одновременно восстановление ванадия из названной золы требует исследования и оптимизации соответствующих превращений. **Цель.** Разработка процесса выщелачивания ванадия из летучей золы ТЭЦ серной кислотой и восстановителем сульфитом натрия. **Методы.** Методы химического эксперимента, фотометрического и атомно-эмиссионного анализа металлов, анализа и интерпретации результатов. **Результаты и выводы.** Предложен способ выщелачивания ванадия из золы раствором серной кислоты и восстановителя сульфита натрия, позволяющий получить концентрат ванадия (IV) в форме VOSO_4 с целью его дальнейшего селективного извлечения. Использование Na_2SO_3 при выщелачивании обеспечивает восстановление основной массы V(V) до V(IV) по результатам спектрофотометрического анализа концентрата. Тогда как выщелачивание только серной кислотой приводит к извлечению ванадия в пятивалентной форме. Изучены факторы, определяющие эффективность процесса выщелачивания: концентрация серной кислоты, концентрация восстановителя, соотношение фаз жидкость/твёрдое, время и температура выщелачивания. Установлено, что из летучей золы преимущественно выделяются ванадий (>80 %) и никель (>65 %), тогда как железо и марганец в основном остаются в твёрдом остатке. Наибольшее (99,6 %) извлечение ванадия достигается при одновременной обработке раствором 1 М H_2SO_4 и 0,04 М Na_2SO_3 золы в соотношении 4 мл/1 г при температуре 80 °С в течение 30 мин. Практически полный переход ванадия из золы в раствор достигается при трёхкратной промывке остатка дистиллированной водой в соотношении 6 мл/1 г золы. Раствор выщелачивания содержит ионы железа, ванадия, никеля и марганца в концентрациях 5,27, 1,87, 0,58 и 0,031 г/л соответственно и требует разделения физико-химическими методами.

Ключевые слова: ванадий, выщелачивание, серная кислота, сульфит натрия, восстановитель, рекуперация, летучая зола

Благодарности: Измерения концентрации металлов в растворах выполнены на оборудовании Центра коллективного пользования РХТУ имени Д.И. Менделеева.

Для цитирования: Мишин И.В., Нистратов А.В., Пичугов Р.Д. Исследование процесса кислотно-восстановительного выщелачивания ванадия из летучей золы ТЭЦ // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 7. – С. 107–115. DOI: 10.18799/24131830/2025/7/4728

UDC 546.05:546.881
DOI: 10.18799/24131830/2025/7/4728
Scientific paper

Vanadium acid-reducing leaching from the fly ash of a thermal power plant

I.V. Mishin✉, A.V. Nistratov, R.D. Pichugov

Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russian Federation

✉chem.igor5@gmail.com

Abstract. Relevance. Due to the higher initial vanadium content in secondary sources compared to ore deposits, its extraction from the former appears to be a more cost-effective and resource-saving process. Fly ash from burning liquid fuels containing 1.9 wt % vanadium can be considered as a promising secondary source of this metal, which is essential in the production of high-strength alloys, catalysts, and electrolytes for flow batteries. A sufficiently complete extraction and simultaneous recovery of vanadium from the mentioned ash requires research and optimization of the corresponding transformations. **Aim.** Development of vanadium leaching from the fly ash of thermal power plant with sulfuric acid and reducing agent sodium sulfite. **Methods.** Chemical experiment, photometric and atomic emission analysis of metals, analysis and interpretation of the results. **Results and conclusions.** This study proposes a method for leaching vanadium from ash using a solution of sulfuric acid and the reducing agent sodium sulfite, enabling to obtain a concentrate of vanadium (IV) in the form of VOSO_4 for its further selective extraction. The addition of Na_2SO_3 during leaching facilitates the reduction of V(V) to V(IV) , as confirmed by spectrophotometric analysis of the concentrate. On the other hand, leaching with sulfuric acid alone leads to vanadium extraction in the pentavalent form. Leaching efficiency was investigated by studying such factors as sulfuric acid concentration, reducing agent concentration, liquid/solid phase ratio, leaching time, and temperature. Our findings show that vanadium (>80%) and nickel (>65%) are predominantly recovered from fly ash, while iron and manganese mostly remain in the solid residue. The highest extraction efficiency (99,6%) for vanadium was achieved when simultaneous treating ash with a solution of 1 M H_2SO_4 and 0,04 M Na_2SO_3 at 80°C for 30 minutes with ash ratio of 4 ml/1 g. Nearly complete vanadium transition from ash to solution was achieved by washing the residue three times with distilled water at a ratio of 6 ml/1 g of ash. The resulting leaching solution contains ions of iron, vanadium, nickel and manganese in concentrations of 5.27, 1.87, 0.58 and 0.031 g/l respectively and requires separation by physical and chemical methods.

Keywords: vanadium, leaching, sulfuric acid, sodium sulfite, reducing agent, recovery, fly ash

Acknowledgements: Measurements concentrations of metals in solutions were carried out on the equipment of the Center for Collective Use of the Mendeleev University of Chemical Technology of Russia.

For citation: Mishin I.V., Nistratov A.V., Pichugov R.D. Vanadium acid-reducing leaching from the fly ash of a thermal power plant. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 7, pp. 107–115. DOI: 10.18799/24131830/2025/7/4728

Введение

Разработка энерго- и ресурсосберегающих технологий для нужд различных направлений производств – сложная и актуальная задача. Вопросам очистки сточных вод и газов уделяется достаточно много внимания, при этом в последнее время все чаще встает вопрос необходимости переработки крупнотоннажных неорганических отходов. Красные шламы, отработанные ванадиевые катализаторы, фосфогипс, летучая зола – вот лишь краткий перечень отходов, являющихся, по сути, ценнейшим источником соединений металлов для различных отраслей промышленности [1–3].

Ванадий является двадцать вторым по распространённости элементом в земной коре [4]. Однако его добыча осложняется тем, что он относится к рассеянными элементам и в свободном виде не встречается [5]. В последние десятилетия потребление ванадия значительно опережает производство, а его запасы в первичных источниках (титаномагнетитовых и железных рудах) истощаются. В связи с этим необходимо создавать технологии по переработке ванадийсодержащих вторичных материалов с низкими затратами на их реализацию [6]. Это поможет удовлетворить спрос на ванадий, а также снизить себестоимость продукции, в частности, при создании ванадиевых проточных редокс-батарей (ВПРБ) [7]. Тяжелые фракции нефти (мазут) содержат значительное количество ванадия [5]. Поэтому одним из перспективных вторичных ис-

точников ванадия, доступного для переработки, является летучая зола сжигания жидкого топлива. Данный отход образуется в топках тепловых электростанций (ТЭС), теплоэлектроцентралях (ТЭЦ) и котельных [8]. Зола сжигания мазута содержит до 15–20 % V_2O_5 [5], что превышает его содержание 0,1–0,2 % в первичных источниках (рудах, минералах) [9].

Основным методом извлечения ванадия из летучей золы является выщелачивание. Поскольку преобладающими фазами минеральной части золы уноса являются алюмосиликаты сложного состава, которые способны разлагаться лишь в концентрированных растворах выщелачивающих реагентов, соответственно, выщелачивание водой не является универсальным и эффективным методом. Исследование [10] по выщелачиванию обычной водой при температуре 60–80 °C в соотношении твёрдая фаза/жидкость 1:4 в течение 30 мин. дают выход по ванадию 1,3 %. Другое исследование [11] показало, что выщелачивание водой даёт всего 0,7 % выхода по ванадию. Поэтому традиционными выщелачивающими реагентами являются серная кислота, гидроксид натрия, а также различные натриевые соли [12–15].

Основным фактором, влияющим на степень выщелачивания, является концентрация выщелачивающего реагента. Исследование [12] показало, что с увеличением концентрации H_2SO_4 с 2 до 4 Н степень извлечения ванадия из летучей золы выросла

с 65 до 86 %. Такие факторы, как соотношение фаз жидкость/твёрдое (Ж/Т) и температура реакционной смеси, влияют на смачиваемость золы, а также на контакт между твёрдой фазой золы и жидкой фазой выщелачивающего реагента. Исследования показывают, что увеличение температуры до точки кипения, а также увеличение соотношения Ж/Т от 2 до 5 при выщелачивании 0,5 М серной кислотой приводят к увеличению выхода ванадия в среднем на 5–15 %. Такой разброс в значениях степени извлечения объясняется разным содержанием углерода: чем больше содержание углерода в золе, тем большее соотношение Ж/Т необходимо, поскольку ухудшается смачиваемость золы, а вследствие этого и контакт между твёрдой и жидкой фазами [16].

Для зол с большим содержанием углерода и низким содержанием ванадия прямое выщелачивание оказывается неэффективным, в этом случае необходимо увеличивать расход выщелачивающего реагента для повышения степени извлечения ванадия. Решением такой проблемы может послужить предварительный обжиг золы. Исследования показали, что оптимальная температура обжига составляет 850 °С [17]. При таком условии наблюдается значительная потеря массы золы – на 60 % за 4 ч, максимальное содержание ванадия в обожжённой золе – 18,9 мас. % и незначительная потеря ванадия – 5 мас. %. При последующем выщелачивании 2 М H_2SO_4 выход ванадия составил 99 %. Однако этот метод сопровождается большими энергозатратами и может быть экономически невыгодным.

Существуют методы восстановительного выщелачивания ванадия с помощью Na_2SO_3 , NaHSO_3 , $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_3$ из отработанных катализаторов [18]. При таком условии пятивалентный ванадий восстанавливается до четырёхвалентного в виде сульфата ванадила VOSO_4 , востребованного для приготовления электролитов в проточных батареях [19].

Основной целью данной работы является исследование процесса выделения ванадия из золы путем выщелачивания (экстракции) смесью серной кислоты и сульфита натрия.

Объекты и методика исследования

В работе были использованы следующие реактивы:

- серная кислота (ХЧ, Сигма-тек, Россия);
- сульфит натрия (ЧДА, ЗАО «Купавнреактив», Россия).

Объектом исследования в данной работе является летучая зола, образованная в результате сжигания мазутного топлива на ТЭЦ.

Определение состава твердых образцов проводили методом рентгенофлуоресцентного анализа (РФЛА) с помощью рентгеновского дифрактометра DX-2700BH (Dandong Haoyuan Instrument Co., Ltd.,

Китай) на базе центра коллективного пользования РХТУ им. Д.И. Менделеева.

Содержание ионов металлов в растворах определяли с помощью масс-спектрометра индуктивно-связанной плазмы (ИСП-МС) ICP-MS XSeriesII (Thermo Scientific Inc., США). Измерения выполнены на оборудовании ЦКП им. Д.И. Менделеева.

Элементный состав образца летучей золы представлен в табл. 1.

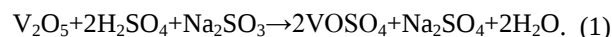
Таблица 1. Элементный состав летучей золы ТЭЦ

Table 1. Elemental composition of fly ash of thermal power plant

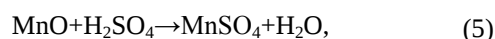
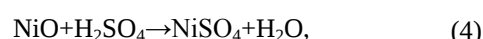
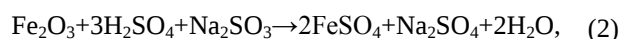
Элемент/Element	Содержание, масс. %/Content, wt %
O	41,92 ± 4,2
S	19,7 ± 2,0
C	16 ± 1,6
Fe	13,4 ± 1,3
V	1,9 ± 0,2
Ni	0,72 ± 0,07
Mn	0,18 ± 0,02

Выщелачивание летучей золы проводилось с помощью серной кислоты и восстановителя сульфита натрия в виде растворов различной концентрации.

Реакция выщелачивания ванадия можно представить уравнением (1):



Реакции выщелачивания железа, никеля и марганца могут быть представлены уравнениями (2)–(6):



Навеску золы массой 5 г помещали в плоскодонную колбу, в которую добавляли выщелачивающий реагент – серную кислоту и сульфит натрия. Концентрация серной кислоты (с H_2SO_4) варьировалась в пределах 0,1–2 М, что обосновано условиями процесса, согласно [12]. Концентрация сульфита натрия (с Na_2SO_3) варьировалась в пределах 0,02–0,1 М, соответствующих 1-; 2-; 3-; 4-; 5-кратному избытку от рассчитанного по уравнению (1). Выщелачивание проводили при постоянном перемешивании магнитной мешалкой (200 об/мин) и нагревании до $t=25\text{--}80\text{ }^\circ\text{C}$ в течение $\tau=15\text{--}90$ мин. Для сохранения соотношения жидкой и твёрдой фаз (Ж/Т) использовали обратный холодильник. После выщелачивания смесь отфильтровывали, промывали осадок дистиллированной во-

дой, высушивали его при температуре 70 °C в течение 1,5 ч.

После выщелачивания смеси отфильтровывали. Далее один остаток промывали дистиллированной водой порциями по 10 мл, другой остаток – по 5 мл. Экстракты и фильтраты анализировали отдельно, затем объединяли. После каждой стадии промывки спектры поглощения экстрактов и фильтратов измеряли на однолучевом спектрофотометре AvaSpec 2048 с источником излучения Avalight-DHc (Avantes, Нидерланды). Длина оптического пути 1 см.

Степени извлечения рассчитаны по формуле (7):

$$\omega = \frac{m_{\text{выщ}}}{m_{\text{зол}}} * 100\%, \quad (7)$$

где $m_{\text{зол}}$ – масса элемента в золе, мг (табл. 1), рассчитывается по формуле (8):

$$m_{\text{выщ}} = c * V, \quad (8)$$

$m_{\text{выщ}}$ – масса элемента, извлеченного из золы, мг; c – концентрация элемента в экстракте мг/л; V – объём экстракта, л.

Результаты исследования и их обсуждение

Исследование сернокислотного выщелачивания с добавкой восстановителя заключается в проведении экспериментов по методике, описанной выше, с последовательным варьированием концентрации кислоты, восстановителя, соотношения Ж/Т, температуры и времени выщелачивания, определяющих степени извлечения ванадия и побочных металлов.

Влияние концентрации кислоты на степень извлечения металлов из золы представлено на рис. 1.

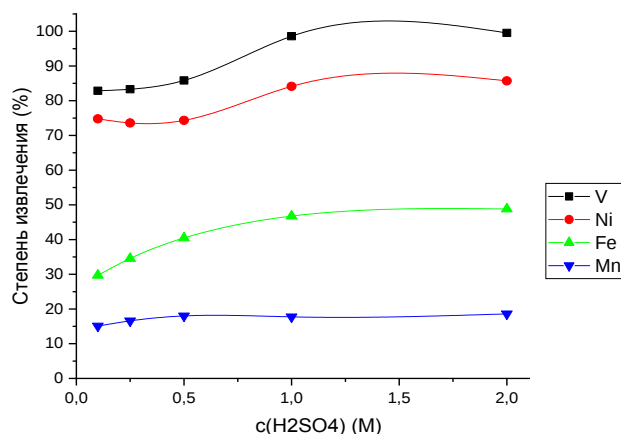


Рис. 1. Зависимость степени извлечения металлов из золы от концентрации серной кислоты (Условия: $c(\text{Na}_2\text{SO}_3)=0,1$ М, Ж/Т=5, $t=80$ °C, $\tau=1,5$ ч)

Fig 1. Dependence of the extraction rate of metals from ash on sulfuric acid concentration (Conditions: $c(\text{Na}_2\text{SO}_3)=0,1$ M, L/S=5, $t=80$ °C, $\tau=1,5$ h)

Степень извлечения железа растёт с 30 до 47 % при увеличении концентрации H_2SO_4 с 0,1 до 1 М, а при дальнейшем увеличении концентрации кислоты практически не меняется. Степень извлечения марганца колеблется в пределах от 15 до 19 % при увеличении концентрации H_2SO_4 с 0,1 до 2 М. Степени извлечения ванадия и никеля имеют одинаковые зависимости: при увеличении концентрации H_2SO_4 с 0,1 до 1 М этот показатель увеличивается с 83 до 98 % и с 75 до 85 % соответственно. Дальнейший рост концентрации кислоты не приводит к увеличению выхода этих металлов.

Высокий выход по ванадию и никелю можно объяснить хорошей растворимостью их соединений в кислых растворах. Невысокий выход по железу и марганцу может быть обусловлен тем, что соединения данных металлов связаны с инертной частью летучей золы. Следовательно, оптимальную концентрацию серной кислоты, обеспечивающую наибольший выход ванадия, устанавливаем равной 1 М.

Концентрация восстановителя не так сильно влияет на степень выщелачивания, как концентрация кислоты (рис. 2). Степень выщелачивания железа и марганца не меняется с увеличением концентрации Na_2SO_3 с 0,02 до 0,1 М и колеблется в пределах 47 и 19 % соответственно. Степень выщелачивания ванадия и никеля лежит в пределах 95 и 86 % соответственно, хотя при максимальном избытке восстановителя она достигает 99 %. При этом чем больше концентрация восстановителя, тем больше будет концентрация четырёхвалентного ванадия. На данном этапе принято, что оптимальная концентрация Na_2SO_3 , которая обеспечивает высокий выход по ванадию и одновременно с этим перевод ванадия в четырёхвалентную форму (как показано ниже), составляет 0,04 М.

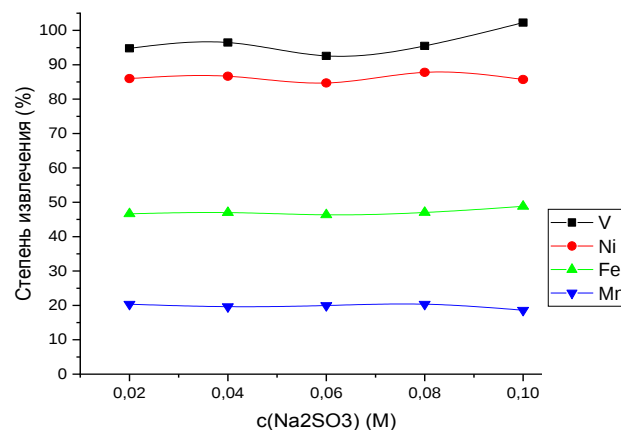


Рис. 2. Зависимость степени извлечения металлов из золы от концентрации сульфита натрия (Условия: $c(\text{H}_2\text{SO}_4)=1$ М, Ж/Т=5, $t=80$ °C, $\tau=1,5$ ч)

Fig. 2. Dependence of the extraction rate of metals from ash on sodium sulfite concentration (Conditions: $c(\text{H}_2\text{SO}_4)=1$ M, L/S=5, $t=80$ °C, $\tau=1,5$ h)

Влияние соотношения Ж/Т (мл/г) на степень извлечения металлов из золы представлено на рис. 3. Соотношение Ж/Т не сильно влияет на степени извлечения металлов. Это может объясняться тем, что зола имеет низкое содержание углерода в своём составе (16 %) по сравнению с [12, 16], поэтому для извлечения металлов не требуется хорошая смачиваемость золы. Степень извлечения марганца остаётся постоянной – 18–19 % при любом соотношении Ж/Т. Степень извлечения железа растёт с 42 до 47 % при увеличении Ж/Т с 2 до 10. Степень извлечения ванадия колеблется в пределах от 93 до 99 % при увеличении Ж/Т от 2 до 10. Это означает, что соотношение Ж/Т слабо влияет на выход ванадия. Степень извлечения никеля колеблется в районе 78–87 %, достигая максимума при Ж/Т=5. Оптимальным соотношением Ж/Т, которое обеспечивает высокий выход по ванадию (97 %), а также хорошую текучесть пульпы золы и выщелачивающего раствора, было выбрано 4.

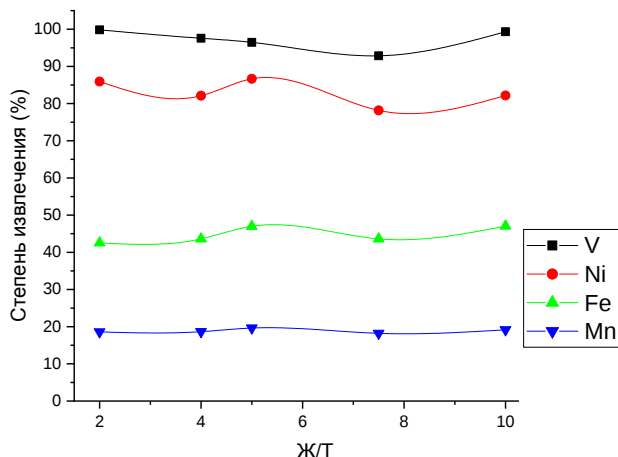


Рис. 3. Зависимость степени извлечения металлов из золы от соотношения жидкой и твердой фаз (Условия: $c(\text{H}_2\text{SO}_4)=1 \text{ M}$, $c(\text{Na}_2\text{SO}_3)=0,04 \text{ M}$, $t=80^\circ\text{C}$, $\tau=1,5 \text{ ч}$)

Fig. 3. Dependence of the extraction rate of metals from ash on the ratio of liquid and solid phases (Conditions: $c(\text{H}_2\text{SO}_4)=1 \text{ M}$, $c(\text{Na}_2\text{SO}_3)=0,04 \text{ M}$, $t=80^\circ\text{C}$, $\tau=1,5 \text{ h}$)

Влияние температуры реакционной смеси при выщелачивании на степень извлечения металлов из золы представлено на рис. 4. С увеличением температуры с 25 до 40°C степени извлечения ванадия и никеля уменьшаются с 79 до 71 % и с 69 до 61 % соответственно. Тогда как степени выщелачивания железа и марганца возрастают с 29 до 41 % и с 14 до 20 % соответственно. Это может объясняться тем, что железо и марганец легче вступают в реакцию с серной кислотой при повышенной температуре. При дальнейшем повышении температуры до 80°C степени извлечения железа и марганца практически не

меняются, а степень извлечения ванадия и никеля существенно растёт. Максимум извлечения достигается при 80°C и составляет 97 % для ванадия и 82 % для никеля. Следовательно, оптимальной температурой выщелачивания является 80°C .

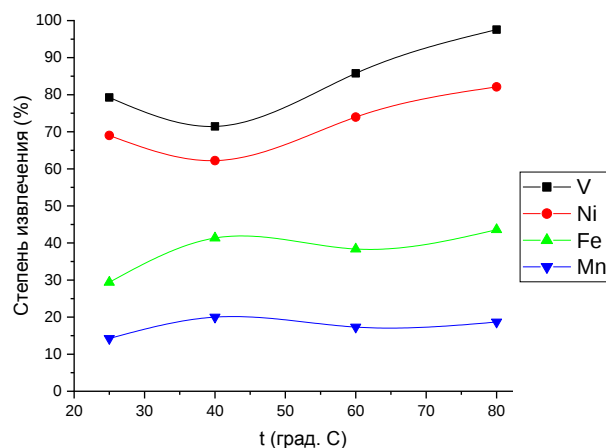


Рис. 4. Зависимость степени извлечения металлов из золы от температуры (Условия: $c(\text{H}_2\text{SO}_4)=1 \text{ M}$, $c(\text{Na}_2\text{SO}_3)=0,04 \text{ M}$, Ж/Т=4, $\tau=1,5 \text{ ч}$)

Fig. 4. Temperature dependence of the extraction rate of metals from ash (Conditions: $c(\text{H}_2\text{SO}_4)=1 \text{ M}$, $c(\text{Na}_2\text{SO}_3)=0,04 \text{ M}$, $L/ST=4$, $\tau=1,5 \text{ h}$)

Влияние времени контакта золы с раствором выщелачивания на степень извлечения металлов из золы представлено на рис. 5.

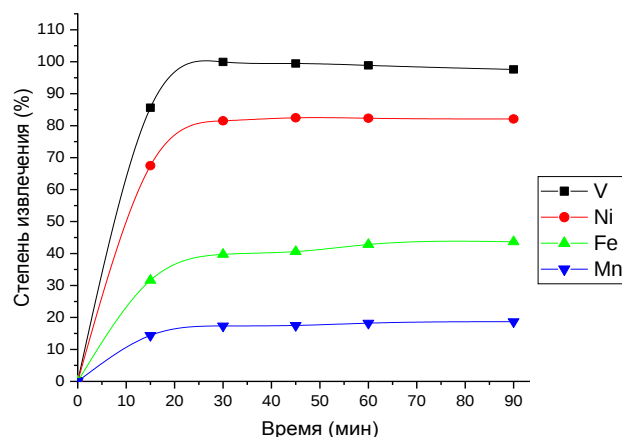


Рис. 5. Кинетика извлечения металлов из золы (Условия: $c(\text{H}_2\text{SO}_4)=1 \text{ M}$, $c(\text{Na}_2\text{SO}_3)=0,04 \text{ M}$, Ж/Т=4, $t=80^\circ\text{C}$)

Fig. 5. Kinetics of metal extraction from ash (Conditions: $c(\text{H}_2\text{SO}_4)=1 \text{ M}$, $c(\text{Na}_2\text{SO}_3)=0,04 \text{ M}$, $L/S=4$, $t=80^\circ\text{C}$)

Степень извлечения металлов растёт на протяжении 30 мин, а затем, достигнув максимума, остаётся постоянной. Таким образом, химическое взаи-

модействие завершается в течение 30 минут. При увеличении времени выщелачивания с 15 до 30 мин степень извлечения ванадия увеличивается с 85 до 99 %, никеля – с 67 до 81 %, железа – с 31 до 40 %, марганца – с 14 до 17 %. При дальнейшем увеличении времени выщелачивания металлов повышаются лишь на 2–3 %. Таким образом, достаточным временем выщелачивания является 30 мин.

При промывке остатка золы показателем полноты извлечения ванадия является содержание его в фильтрате (экстракте), оцененное по максимуму поглощения при длине волны 761 нм (рис. 7). Объемы промывной воды (5 и 10 мл) соответствуют наименьшему количеству воды на 5 г золы. Необходимое число стадий промывки и порции дистиллированной воды (по 10 или по 5 мл на 5 г золы) определяли по постоянному значению оптической плотности. На рис. 6 видно, что оптическая плотность при промывке порциями по 10 мл экспоненциально убывает с увеличением объема воды, а при промывке по 5 мл резко снижается в первых трех порциях фильтрата. Оптическая плотность не меняется при объеме промывной воды больше 30 мл в обоих случаях. Это означает, что из остатка золы извлеклось большее количество ионов ванадия. Следовательно, можно сделать вывод, что минимально необходимый объем промывной воды составляет 30 мл (3 порции по 10 мл) на 5 г золы.

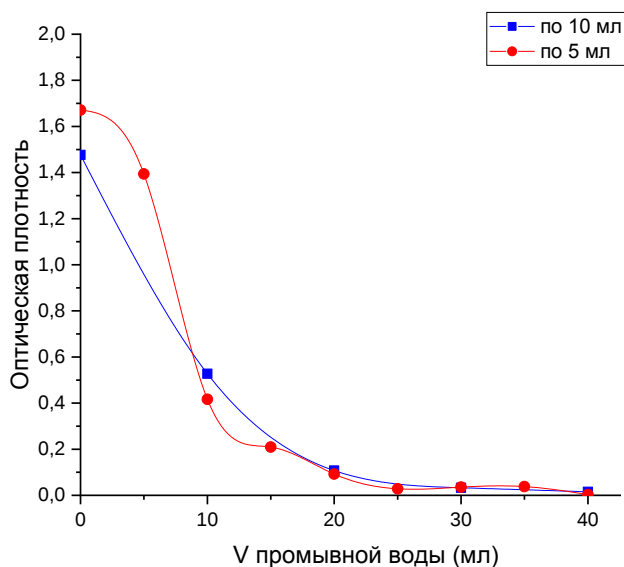


Рис. 6. Зависимость оптической плотности фильтратов от объема промывной воды

Fig. 6. Dependence of the optical density of filtrates on washing water volume

При оптимальных условиях выщелачивания: концентрации H_2SO_4 1 М, концентрации Na_2SO_3 0,04 М, соотношении Ж/Т=4, температуре 80 °С,

времени 30 мин и объеме промывной воды 30 мл на 5 г золы, был установлен результирующий состав экстракта (табл. 2).

Таблица 2. Концентрации металлов в экстракте и степени их извлечения

Table 2. Concentrations of metals in the extract and the degree of their extraction

Элемент Element	Концентрация элемента в экстракте, с, г/л Element concentration in the extract, c, g/l	Степень извлечения, % Extraction rate, %
V	1,87	99,6
Ni	0,58	81,5
Fe	5,27	39,7
Mn	0,031	39,7

Для установления валентной формы ванадия в экстракте был измерен его оптический спектр поглощения в сравнении со спектрами поглощения отдельных растворов V (IV), Fe(III), Fe (II), Ni (II), Mn (II) (рис. 7). Концентрации металлов были выбраны на основании данных табл. 2. Как видно, в оптическом диапазоне спектр поглощения экстракта полностью определяется поглощением формы V (IV), что указывает на восстановление извлеченного из золы V (V) в процессе сернокислотного выщелачивания с добавлением неорганического восстановителя.

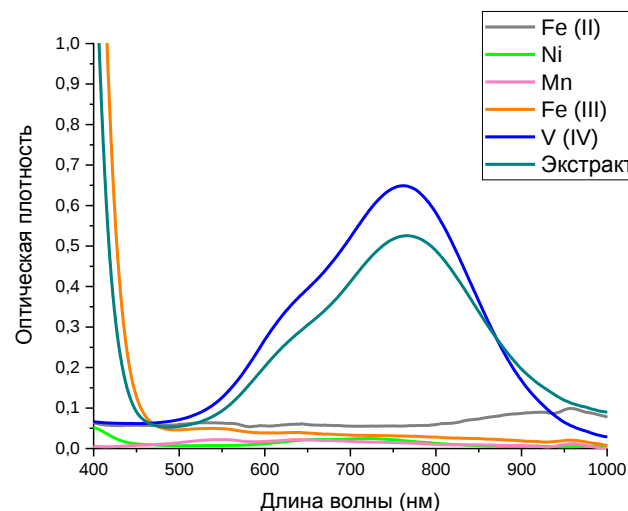


Рис. 7. Спектры поглощения экстракта, растворов ванадия (IV), железа (III), железа (II), никеля (II), марганца (II). В качестве фонового использован спектр раствора серной кислоты с pH=0,6. Длина оптического пути 1 см

Fig. 7. Absorption spectra of the extract, solutions of vanadium (IV), iron (III), iron (II), nickel (II), manganese (II). The spectrum of a sulfuric acid solution with pH=0.6 was used as the background. The optical path length is 1 cm

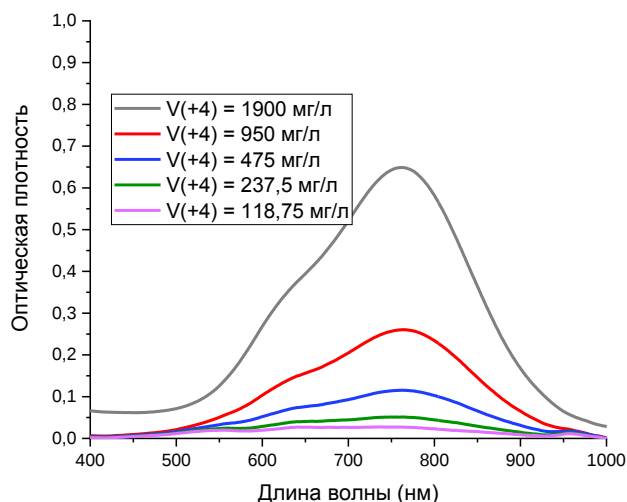


Рис. 8. Спектры поглощения V^{+4} в диапазоне концентраций от 118,75 до 1900 мг/л. В качестве фонового использован раствор серной кислоты с $pH=0,6$. Длина оптического пути 1 см

Fig. 8. Absorption spectra of V^{+4} in the concentration range from 118.75 to 1900 mg/l. A sulfuric acid solution with $pH=0.6$ was used as the background. The optical path length is 1 cm

По спектрам невозможно определить концентрацию $V(V)$, потому что $V(V)$ имеет характерное поглощение в той же области длин волн, где и ионы $Fe(III)$. Кроме того, известно, что $V(V)$ имеет чрезвычайно высокий коэффициент экстинкции [20], что дополнительно затрудняет анализ. При длине волны $\lambda=761$ нм максимум поглощения приходится только на $V(IV)$, тогда как другие металлы не имеют поглощения в этой области. По пику по-

глощения при данной длине волны можно определить концентрацию $V(IV)$.

По спектрограммам (рис. 8) получен градуировочный график зависимости оптической плотности от концентрации $V(IV)$. При $\lambda=761$ нм коэффициент экстинкции составляет $\varepsilon=4 \cdot 10^{-3}$ л/(мг·см). Доля $V(IV)$ в экстракте составляет 75,4 мас. % от общего содержания V .

Заключение

Исследованы параметры, влияющие на процесс выщелачивания ванадия из летучей золы сжигания мазута. Установлено, что кислотно-восстановительное выщелачивание позволяет извлечь 99,6 % ванадия при следующих условиях: концентрации H_2SO_4 1 М, концентрации Na_2SO_3 0,04 М, соотношении Ж/Т=4/1, температуре 80 °С, времени выщелачивания 30 мин. Рациональная схема промывки остатка выщелачивания: три последовательные порции дистиллированной воды объемом по 10 мл на 5 г золы.

Спектрофотометрический анализ экстрактов позволяет судить о преобладании формы $V(IV)$ над $V(V)$. Полученный в наилучших условиях экстракт характеризуется соотношением $Fe > V > Ni > Mn$ и представляет ценный концентрат, селективное извлечение ванадия из которого возможно химическим или физико-химическими методами.

Полученные сернокислые растворы могут стать ценным источником соединений никеля, ванадия и марганца для нужд металлургической промышленности, а переработка золошлаковых отходов позволит сделать шаг к реализации концепции Zero waste в рамках экономики замкнутого цикла.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузин Е.Н., Кручинина Н.Е. Получение комплексных коагулянтов на основе минеральных концентратов и их использование в процессах очистки воды // Обогащение руд. – 2019. – № 3. – С. 43–48.
2. Кузин Е.Н., Кручинина Н.Е. Получение комплексных коагулянтов на основе крупнотоннажных отходов и продуктов промышленных производств // Цветные металлы. – 2021. – № 1. – С. 13–18.
3. Кузин Е.Н., Кручинина Н.Е. Получение отвержденных форм алюмокремниевых коагулянтов и их использование в процессах водоочистки и водоподготовки // Цветные металлы. – 2016. – № 10. – С. 8–13.
4. Moskalych R.R., Alfantazi A.M. Processing of vanadium. A review // Minerals Engineering. – 2003. – Vol. 16. – № 9. – P. 793–805.
5. Чурилов А.Е., Мукаев Е.Г., Горбунова А.В. Ванадийсодержащие ресурсы и химические способы их переработки // Теория и технология металлургического производства. – 2017. – № 3 (22). – С. 30–33.
6. Колоскова И.С. Мировой и российский рынок ванадия // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. – 2022. – № 2 (177). – С. 80–84.
7. Redox flow batteries: role in modern electric power industry and comparative characteristics of the main types / M.M. Petrov, A.E. Antipov, P.A. Loktionov, R.D. Pichugov, N.V. Kartashova, A.T. Glazkov, L.Z. Abunaeva, D.V. Konev, A.D. Modestov, V.N. Andreev, M.A. Vorotyntsev // Russian Chemical Reviews. – 2021. – Vol. 90 (6). – P. 677–702.
8. Плохов А.С., Смирнов Ю.Д. Проблема извлечения ванадия из мазутных зол // Современное общество: глобальные и региональные процессы: Материалы I международной научн. конф. – СПб, 14–15 марта 2017. – СПб: ООО «Айсинг», 2017. – С. 23–28.
9. Вытоптова А.И., Тихомирова А.В. Извлечение ванадия из вторичного сырья // Россия молодая: Сборник материалов XII всероссийской, научно-практ. конф. молодых ученых с международным участием. – Кемерово, 21–24 апреля 2020. – Кемерово: Кузбасский гос. техн. ун-т., 2020. – С. 74205.1–74205.4.
10. Извлечение ванадия из золы, получаемой при сжигании мазута на тепловых электростанциях / М.В. Цыганкова, В.И. Букин, Е.И. Лысакова, А.Г. Смирнова, А.М. Резник // Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия. – 2011. – № 1. – С. 21–26.

11. Извлечение ванадия из золы от сжигания мазута / М.М. Ахмедов, Б.С. Валиев, Г.А. Кадырова, А.А. Гейдаров // Химическая промышленность сегодня. – 2011. – № 2. – С. 18–24.
12. Shang-Lin Tsai, Min-Shing Tsai A study of the extraction of vanadium and nickel in oil-fired fly ash // Resources, Conservation and Recycling. – 1998. – Vol. 22. – № 3–4. – P. 163–176.
13. Jamal Stas, Ajaj Dahdouh, Omar Al-chayah. Recovery of vanadium, nickel and molybdenum from fly ash of heavy oil-fired electrical power station // Periodica Polytechnica Chemical Engineering. – 2007. – Vol. 51 (2). – P. 67–70.
14. Vanadium recovery from oil fly ash by leaching, precipitation and solvent extraction processes / R. Navarro, J. Guzman, I. Saucedo J. Revilla, E. Guibalc // Waste Management. – 2007. – Vol. 27. – № 3. – P. 425–438.
15. A sustainable method for germanium, vanadium and lithium extraction from coal fly ash: Sodium salts roasting and organic acids leaching / Homa Rezaei, Sied Ziaedin Shafaei, Hadi Abdollahi, Alireza Shahidi, Sina Ghassaa // Fuel. – 2022. – Vol. 312. – P. 1–9.
16. Recovery of vanadium from heavy oil and Orimulsion fly ashes / S. Vitolo, M. Seggiani, S. Filippi, C. Brocchini // Hydrometallurgy. – 2000. – Vol. 57. – № 2. – P. 141–149.
17. Vitolo S., Seggiani M., Falaschi F. Recovery of vanadium from a previously burned heavy oil fly ash // Hydrometallurgy. – 2001. – Vol. 64. – № 3. – P. 145–150.
18. Selective recovery of vanadium pentoxide from spent catalysts of sulfuric acid production: Sustainable approach / E. Romanovskaia, V. Romanovski, W. Kwapinski, I. Kurilo // Hydrometallurgy. – 2021. – Vol. 200. – P. 1–10.
19. Способ получения электролита для ванадиевой проточной редокс-батареи: пат. № 280329, Российская Федерация, С1; заявл. 01.04.2022; опубл. 12.09.2023 Бюл. № 26. – 18 с.
20. Towards optical monitoring of Vanadium Redox Flow Batteries (VRFBs): an investigation of the underlying spectroscopy / D.N. Buckley, X. Gao, R.P. Lynch, N. Quill, M.J. Leahy // Journal of The Electrochemical Society. – 2014. – Vol. 161. – P. 524–534.

Информация об авторах

Игорь Викторович Мишин, магистрант, кафедра промышленной экологии, Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Россия, 125047, г. Москва, Миусская площадь, 9, стр. 1; <https://orcid.org/0009-0004-8253-3608>; chem.igor5@gmail.com

Алексей Викторович Нистратов, канд. техн. наук, доцент, кафедра промышленной экологии, Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Россия, 125047, г. Москва, Миусская площадь, 9, стр. 1; <https://orcid.org/0000-0002-6089-5497>; alvinist@yandex.ru

Роман Дмитриевич Пичугов, канд. физ.-мат. наук, старший преподаватель, научно-образовательная лаборатория «ЭМХиТ», Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Россия, 125047, г. Москва, Миусская площадь, 9, стр. 1; <https://orcid.org/0000-0001-7353-2938>; pichugov.r.d@muctr.ru

Поступила в редакцию: 07.06.2024

Поступила после рецензирования: 05.09.2024

Принята к публикации: 21.04.2025

REFERENCES

1. Kuzin E.N., Kruchinina N.E. Production of complex coagulants based on mineral concentrates and their use in water treatment. *Obogashchenie Rud*, 2019, no. 3, pp. 43–48. (In Russ.)
2. Kuzin E.N., Kruchinina N.E. Complex coagulants produced from bulk waste and industrial products. *Tsvetnye Meyally*, 2021, no. 1, pp. 13–18. (In Russ.)
3. Kuzin E.N., Kruchinina N. E. Obtaining cured forms of aluminosilicon coagulant and their use in water treatment and water treatment processes. *Tsvetnye Meyally*, 2016, no. 10, pp. 8–13. (In Russ.)
4. Moskalyk R.R., Alfantazi A.M. Processing of vanadium. A review. *Minerals Engineering*, 2003, vol. 16, no. 9, pp. 793–805.
5. Churilov A.E., Mukaeve E.G., Gorbunova A.V. Vanadium-containing resources and chemical methods for their processing. *Theory and technology of metallurgical production*, 2017, no. 3 (22), pp. 30–33. (In Russ.)
6. Koloskova I.S. Global and russian vanadium market. *Mineralnye resursy Rossii. Ekonomika i upravlenie*, 2022, no. 2 (177), pp. 80–84. (In Russ.)
7. Petrov M.M., Antipov A.E., Loktionov P.A., Pichugov R.D., Kartashova N.V., Glazkov A.T., Abunaeva L.Z., Konev D.V., Modestov A.D., Andreev V.N., Vorotyntsev M.A. Redox flow batteries: role in modern electric power industry and comparative characteristics of the main types. *Russian Chemical Reviews*, 2021, vol. 90 (6), pp. 677–702.
8. Plokhov A.S., Smirnov Yu.D. The problem of vanadium extraction from fuel oil. *Modern society: global and regional processes. Materials of the I International Scientific Conference*. St. Petersburg, March 14–15, 2017. St. Petersburg, LTD «Aising» Publ., 2017. pp. 23–28.
9. Vytoptova A.I., Tikhomirova A.V. Extraction of vanadium from secondary raw materials. *Rossiya molodaya. Collection of materials of the XII All-Russian scientific and practical conference of young scientists with international participation*. Kemerovo, April 21–24, 2020. Kemerovo, Kuzbass State Technical University Publ., 2020. pp. 74205.1–74205.4.
10. Tsygankova M.V., Bukin V.I., Lysakova E.I., Smirnova A.G., Reznik A.M. The recovery of vanadium from ash obtained during the combustion of fuel oil at thermal power stations. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*, 2011, no. 1, pp. 21–26. (In Russ.)
11. Akhmedov M.M., Valiev B.S., Kadyrova G.A., Geydarov A.A. Extraction of vanadium from ash from fuel oil combustion. *Khimicheskaya promyshlennost segodnya*, 2011, no. 2. pp. 18–24. (In Russ.)
12. Shang-Lin Tsai, Min-Shing Tsai. A study of the extraction of vanadium and nickel in oil-fired fly ash. *Resources, Conservation and Recycling*, 1998, vol. 22, no. 3–4, pp. 163–176.

13. Jamal Stas, Ajaj Dahdouh, Omar Al-chayah. Recovery of vanadium, nickel and molybdenum from fly ash of heavy oil-fired electrical power station. *Periodica Polytechnica Chemical Engineering*, 2007, vol. 51 (2), pp. 67–70.
14. Navarro R., Guzman J., Saucedo I., Revilla J., Guibalc E. Vanadium recovery from oil fly ash by leaching, precipitation and solvent extraction processes. *Waste Management*, 2007, vol. 27, no. 3, pp. 425–438.
15. Homa Rezaei, Sied Ziaedin Shafaei, Hadi Abdollahi, Alireza Shahidi, Sina Ghassaa. A sustainable method for germanium, vanadium and lithium extraction from coal fly ash: Sodium salts roasting and organic acids leaching. *Fuel*, 2022, vol. 312, pp. 1–9.
16. Vitolo S., Seggiani M., Filippi S., Brocchini C. Recovery of vanadium from heavy oil and Orimulsion fly ashes. *Hydrometallurgy*, 2000, vol. 57, no. 2, pp. 141–149.
17. Vitolo S., Seggiani M., Falaschi F. Recovery of vanadium from a previously burned heavy oil fly ash. *Hydrometallurgy*, 2001, vol. 64, no. 3, pp. 145–150.
18. Romanovskaia E., Romanovski V., Kwapinski W., Kurilo I. Selective recovery of vanadium pentoxide from spent catalysts of sulfuric acid production: sustainable approach. *Hydrometallurgy*, 2021, vol. 200, pp. 1–10.
19. Konev D.V., Loktionov P.A., Pichugov R.D., Kartashova N.V., Usenko A.A., Petrov M.M., Antipov A.E., Dobrovolsky Yu.A., Kashin A.M. *Method of obtaining electrolyte for vanadium flow redox battery*. Patent RF, no. 280329, 2023. (In Russ.)
20. Buckley D.N., Gao X., Lynch R.P., Quill N., Leahy M.J. Towards optical monitoring of Vanadium Redox Flow Batteries (VRFBs): an investigation of the underlying spectroscopy. *Journal of The Electrochemical Society*, 2014, vol. 161, pp. 524–534.

Information about the authors

Igor V. Mishin, Master Student, Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, 9, Miusskaya square, Moscow, 125047, Russian Federation; chem.igor5@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0004-8253-3608>

Alexey V. Nistratov, Cand. Sc., Assistant Professor, Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, 9, Miusskaya square, Moscow, 125047, Russian Federation; alvinist@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6089-5497>

Roman D. Pichugov, Cand. Sc., Senior Lecturer, Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, 9, Miusskaya square, Moscow, 125047, Russian Federation; pichugov.r.d@muctr.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7353-2938>.

Received: 07.06.2024

Revised: 05.09.2024

Accepted: 21.04.2025

УДК 622.271:622.7
DOI: 10.18799/24131830/2025/7/4821
Шифр специальности ВАК: 25.00.22
Научная статья

Повышение эффективности освоения золоторудных месторождений путем применения гибкой схемы управления качеством руд при их транспортировке

А.Ю. Чебан✉

Институт горного дела Дальневосточного отделения Российской академии наук, Россия, г. Хабаровск

✉ chebanay@mail.ru

Аннотация. Актуальность. Ухудшение качества минерально-сырьевой базы предопределяет необходимость освоения сложноструктурных месторождений с относительно низким содержанием металла в рудах, в результате чего непрерывно возрастают объемы горных работ, при этом в процессе ведения открытой добычи из недр извлекается и складывается большое количество некондиционных руд, в которых в ряде случаев содержится существенная доля запасов металла месторождения. **Цель.** Повышение эффективности ведения открытой разработки крупных золоторудных месторождений путем извлечения продуктивных фракций из некондиционного минерального сырья с применением технико-технологического решения, обеспечивающего гибкое управление качеством вовлекаемых в переработку руд. **Объект.** Некондиционное минеральное сырье одного из золоторудных месторождений. **Результаты и выводы.** В процессе экспериментальных исследований установлено, что в пробах взорванной некондиционной рудной массы содержание золота в мелких классах (–15+10, –10+5 и –5+0 мм) в 1,38–2,30 раза превышает среднее содержание золота в пробах, в связи с чем данные классы после выделения из рудной массы можно рентабельно перерабатывать вместе с кондиционной бедной рудой посредством кучного выщелачивания. Предложена схема добычи и переработки минеральной массы сложноструктурного выемочного блока с гибким управлением качеством руд при их транспортировке, заключающаяся в крупнопорционной сортировке руды в автосамосвалах и последующем выделении из некондиционной руды с различным содержанием полезного компонента продуктивных фракций рационального размера. Выделение продуктивных фракций осуществляется на усовершенствованном грохотильно-дробильном перегрузочном пункте в процессе перемещения руд автомобильно-конвейерным транспортом. Проведенные расчеты применительно к одному из выемочных блоков рассматриваемого золоторудного месторождения показали, что реализация предлагаемой технологической схемы позволит дополнительно вовлечь в переработку рудную массу, содержащую 7,3 % извлекаемого из недр металла, что в 1,62 раза уменьшит потери золота со складываемыми некондиционными рудами.

Ключевые слова: некондиционная руда, продуктивные фракции, содержание металла, комбинированный транспорт, перегрузочный пункт, грохочение, кучное выщелачивание

Для цитирования: Чебан А.Ю. Повышение эффективности освоения золоторудных месторождений путем применения гибкой схемы управления качеством руд при их транспортировке // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 7. – С. 116–124. DOI: 10.18799/24131830/2025/7/4821

UDC 622.271:622.7
DOI: 10.18799/24131830/2025/7/4821
Scientific paper

Improving the efficiency of gold ore deposit development by using a flexible ore quality management scheme during their transportation

A.Yu. Cheban✉

Mining Institute of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Khabarovsk, Russian Federation

✉ chebanay@mail.ru

Abstract. Relevance. The deterioration of the quality of the mineral resource base predetermines the need to develop complex-structured deposits with a relatively low metal content in the ores. As a result the volume of mining operations is continuously increasing, while in the process of open-pit mining a large amount of substandard ores are extracted from the subsoil and stored, which in some cases contain a significant share of the deposit metal reserves. **Aim.** Improving the efficiency of open-pit mining at large gold ore deposits by extracting fine ore from substandard mineral raw materials using an innovative solution that provides flexible quality management of ores involved in processing. **Object.** Substandard mineral raw materials from one of the gold ore deposits. **Results and conclusions.** It was established that in the samples of blasted substandard ore mass the gold content in small classes ($-15+10$, $-10+5$ and $-5+0$ mm) is 1.38–2.30 times higher than the average gold content in the samples. In this relation these classes after separation from the ore mass can be profitably processed together with standard poor ore by means of heap leaching. The article proposes a scheme for the extraction and processing of mineral mass from a complex-structured mining block with flexible control of ore quality during transportation, consisting of large-portion sorting of ore in dump trucks and subsequent separation of productive fractions of rational size from substandard ore with different contents of useful components. The separation of productive fractions is carried out at an improved screening and crushing transfer point during ore moving by automobile and conveyor transport. The calculations carried out for one of the extraction blocks of the gold ore deposit under consideration showed that the implementation of the proposed technological scheme will allow additional involvement in processing of the ore mass containing 7.3% of the metal extracted from the subsoil, which will reduce gold losses with stored substandard ores by 1.62 times.

Keywords: substandard ore, productive fractions, metal content, combined transport, transfer point, screening, heap leaching

For citation: Cheban A.Yu. Improving the efficiency of gold ore deposit development by using a flexible ore quality management scheme during their transportation. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 7, pp. 116–124. DOI: 10.18799/24131830/2025/7/4821

Введение

Добыча полезных ископаемых является важной составляющей экономики многих регионов Российской Федерации. Так, в отраслевой структуре валового регионального продукта в Дальневосточном федеральном округе добыча полезных ископаемых составляет более 27 %, превышая в ряде регионов уровень 40 % [1]. Интенсивная отработка месторождений с наиболее богатыми рудами привела к снижению качества оставшихся запасов. Так, в РФ за период с 1991 по 2012 гг. в доказанных запасах среднее содержание золота снизилось с 4,3 до 2,4 г/т [2]. Однако благодаря благоприятной конъюнктуре и внедрению новых технологий появилась возможность вовлечь в отработку запасы с относительно невысоким содержанием металла в руде [3–5]. За последние годы добыча золота в России значительно увеличилась. Так, только в дальневосточных регионах его производство возросло с 127,3 т в 2014 г. до 192,8 т в 2021 г. [1]. Снижение содержания полезного компонента в рудах при одновременном увеличении спроса на металлы предопределяет многократный рост объемов извлекаемой из недр горной массы, в которой основную долю составляют техногенные отходы в виде вскрышных и вмещающих пород, а также некондиционных руд. В Российской Федерации с 2016 по 2022 гг. количество техногенных отходов, ежегодно образуемых в результате деятельности горных предприятий, ведущих разработку металлорудных месторождений, увеличилось с 0,96 до 2,4 млрд т [6]. Таким образом, в настоящее время расширение минерально-сырьевой базы и возможность рентабельной отработки месторождений при перманентно ухудшающихся горно-

технических и горно-геологических условиях должно обеспечиваться за счет внедрения усовершенствованных малоотходных энергоэффективных технологий с комплексной переработкой разнородного минерального сырья, включая некондиционную рудную массу [7–11].

Состояние вопроса и постановка проблемы

Наибольшее количество техногенных отходов в виде вскрышных и минерализованных вмещающих пород, а также некондиционной рудной массы образуется в результате деятельности предприятий, ведущих разработку месторождений открытым способом. Так, на карьере Светлинский из 22,2 млн м³ извлекаемой горной массы техногенные отходы составляют 17,8 млн м³, а на карьере Курасан из 12,0 млн м³ – 10,8 млн м³ [12]. Необходимо отметить, что в ряде случаев складированные некондиционные руды содержат значительную долю металла месторождения [12–15]. Кроме того, сложная структура отдельных выемочных блоков, интенсивное переслаивание включений кондиционных руд малой мощности с некондиционными рудами и вмещающими породами не позволяют селективно извлечь такие запасы с сохранением их природного качества. В результате происходит значительное разубоживание кондиционных руд, и они вынужденно складываются вместе с техногенными отходами, при этом объем теряемого таким образом кондиционного сырья может достигать десятков процентов [5, 6]. Вовлечь в переработку бедные и некондиционные руды позволяет использование комбинированных технологических схем, предпо-

лагающих применение таких низкзатратных способов, как кучное или отвальное выщелачивание. Организация производственных процессов по извлечению благородных и цветных металлов из бедных руд и ранее некондиционного минерального сырья актуальна для многих стран [16–19].

Снизить потери кондиционного сырья и улучшить его качество за счет выделения некондиционных руд и пустых пород позволяет крупнопорционная сортировка на рентгенорадиометрических контрольных автомобильных станциях. Крупнопорционная сортировка при относительно небольших капитальных и эксплуатационных затратах может обеспечить контроль качества больших объемов рудной массы. Комплексы регистрирующей аппаратуры позволяют опробовать порции руд с порогом определения меди и никеля по 0,1 %, кобальта – 0,05 %, олова – 0,015 %, вольфрама – 0,04 % [20]. Так, на карьере Инкур крупнопорционная сортировка руды со средним содержанием WO_3 , равным 0,147 %, позволила выделить 41 % товарной руды (0,20 % WO_3) и 59 % некондиционной руды (0,08 % WO_3), направленной в специальный штабель [21]. Использование на карьере Мурунтау крупнопорционной сортировки забалансовых золотосодержащих руд позволило выделить из некондиционного потока около 25 % товарных руд, обогащенных металлом в 1,5 раза, что существенно уменьшило потери металла с техногенными отходами [22]. При этом в процессе крупнопорционной сортировки для регистрирующей аппаратуры может устанавливаться несколько граничных значений содержания полезного компонента в руде (пороги сортировки). Так, на золоторудном месторождении Кокпатас при разработке сложноструктурных выемочных блоков поток забалансовой руды разделялся на три продукта по двум порогам сортировки: кондиционная руда с содержанием золота выше 0,7 г/т; некондиционная руда – 0,45–0,7 г/т; минерализованные вмещающие породы – менее 0,45 г/т [23]. Проведенные на предприятии исследования позволили установить, что при сортировке всей добываемой руды выпуск золота на фабрике увеличится на 6,7 % при снижении на 3 % количества подаваемой на фабрику руды, кроме того, объем накапливаемых некондиционных руд сократится более чем на 40 %.

Для многих руд характерно образование в процессе взрывного рыхления мелкой фракции, существенно обогащенной полезным компонентом (в 1,5–3 раза) в сравнении со средним содержанием металла в рудной массе [24]. Таким образом, в некондиционной руде может находиться продуктивная мелкая фракция с содержанием металла достаточным для ее рентабельной переработки. Выделение продуктивных фракций из рудной массы ведется на грохотильно-перегрузочных пунктах, также известны схемы просеивания обогащенной рудной мелочи посредством специального оборудова-

ния при формировании штабелей и отвалов с применением автосамосвалов [24–26]. Необходимо отметить, что использование данных технологических схем ведет к усложнению процесса и повышению затрат в связи с перегрузочными работами, требует использования дополнительного оборудования и персонала, это снижает положительный эффект от вовлечения в переработку полученных продуктивных фракций, кроме того, полностью автомобильная транспортировка всего объема горной массы на крупных карьерах может быть экономически нецелесообразной.

Дополнительно повысить эффективность добычи при больших объемах горных работ и достижениях карьером определенной глубины можно путем перехода с автомобильного на автомобильно-конвейерный транспорт, что позволяет на 30–40 % уменьшить себестоимость перемещения горной массы и до двух раз увеличить производительность труда [27–29]. С применением комбинированных схем транспортировки перемещаются как вскрышные породы, так и руда, например, на карьере Мурунтау (Узбекистан). В дополнение к породному потоку конвейерная линия используется для транспортирования из карьера и складирования в отдельном ярусе конвейерного отвала забалансовой руды. Одновременно на внутрикарьерных промежуточных складах было организовано накапливание руды с последующей «залповой» ее отгрузкой в поточный комплекс. Доля комбинированного транспорта в общем грузопотоке карьера составляет по разным годам 50–65 %, а в общем грузопотоке вскрыши – 70–85 % [30].

Целью работы является повышение эффективности ведения открытой разработки крупных золоторудных месторождений путем извлечения продуктивных фракций из некондиционного минерального сырья с применением технико-технологического решения, обеспечивающего гибкое управление качеством вовлекаемых в переработку руд.

Экспериментальная часть

В Центре коллективного пользования Института горного дела Дальневосточного отделения Российской академии наук с участием автора были проведены экспериментальные исследования двух проб некондиционной рудной массы забойной крупности одного из дальневосточных золоторудных месторождений, фракционированной по классам крупности. Содержание металла в полученных при рассеивании классах устанавливалось атомно-абсорбционным методом с применением спектрофотометра AA-7000 Shimadzu (Япония). Исследования показали значительную вариативность содержания металла, при этом мелкие классы (–15+10, –10+5 и –5+0 мм) существенно обогащены полезным компонентом, а более крупные куски

руды имеют содержание металла ниже среднего (рис. 1). Содержание металла в мелких классах превышает средний показатель в 2,22–2,30, 1,56–1,68 и 1,32–1,38 раза соответственно для фракций –5+0, –10+5 и –15+10 мм. В пробе № 1 к кондиционному по содержанию полезного компонента (более 0,7 г/т) можно отнести классы крупности рудной массы –5+0, –10+5, –15+10 мм, а в пробе № 2 – только класс –5+0 мм, так как остальные классы крупности имеют содержание менее 0,7 г/т. Исходя из данных эксплуатационной разведки в контурах рассматриваемого выемочного блока определено, что среднее содержание металла в некондиционной руде составляет 0,48 г/т.

С учетом полученных результатов исследований проб № 1 и 2 для условной руды с содержанием 0,48 г/т можно пропорционально принять параметры распределения металла по классам крупности: –5+0 мм – 1,08 г/т, –10+5 мм – 0,78 г/т, –15+10 мм – 0,64 г/т. В данном случае продуктивными будут являться классы крупности –5+0 и –10+5 мм.

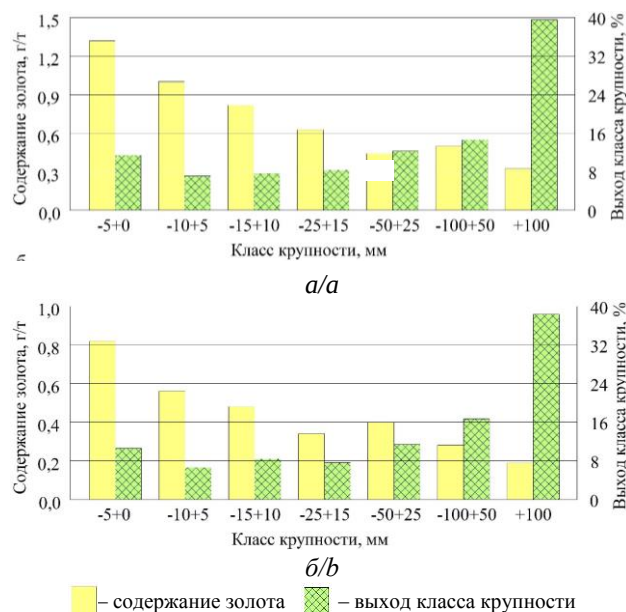


Рис. 1. Распределение металла по классам крупности некондиционной рудной массы: а) проба № 1 (среднее содержание золота 0,59 г/т); б) проба № 2 (среднее содержание золота 0,36 г/т)

Fig. 1. Metal distribution by size classes of substandard ore mass: а) sample no. 1 (average gold content 0.59 g/t); б) sample no. 2 (average gold content 0.36 g/t)

Однако необходимо отметить, что в случае выделения из всего объема некондиционных руд класса –10+0 мм в качестве продуктивной фракции при работе с рудной массой со средним содержанием около 0,6 г/т в продуктивную фракцию не будет вовлекаться класс крупности –15+10 мм с содержанием золота более 0,8 г/т, в то же время в рудной

массе со средним содержанием около 0,4 г/т в продуктивную фракцию будет включен класс –10+5 мм с относительно низким содержанием металла (менее 0,6 г/т). Это с одной стороны приведет к потере части минерального сырья с кондиционным содержанием полезного компонента, а с другой стороны снизит качество выделенной продуктивной фракции. Таким образом, для устранения вышеперечисленных недостатков необходимо применение усовершенствованной технологии с гибким управлением качеством вовлекаемого в переработку некондиционного минерального сырья.

Результаты исследования

Несмотря на достаточно широкую практику вовлечения в переработку некондиционных золотосодержащих руд на многих предприятиях в различных регионах мира, у каждого месторождения имеются свои горнотехнические условия, а также характеристики и особенности руд, которые требуют частного технико-экономического обоснования [19].

Выделение продуктивной фракции целесообразно вести при перевалке некондиционной рудной массы на грохотильно-дробильном перегрузочном пункте карьера при осуществлении процесса ее перемещения автомобильно-конвейерным транспортом. Автором предлагается схема добычи и переработки минеральной массы с гибким управлением ее качеством, обеспечивающая выделение из некондиционной руды с различным содержанием полезного компонента продуктивных фракций (рис. 2).

Селективная выемка разносортной минеральной массы ведется с применением одноковшовых погрузчиков или экскаваторов. Автосамосвалы с некондиционной рудой, бедной и богатой кондиционной рудой направляются на крупнопорционную сортировку, оборудование рудоконтрольной станции настроено на четыре порога сортировки: 0,3, 0,5, 0,7 и 2,0 г/т. В процессе крупнопорционной сортировки выделяются автосамосвалы, загруженные минерализованными вмещающими породами с содержанием менее 0,3 г/т, кондиционной бедной рудой ($C=0,7-2,0$ г/т), кондиционной богатой рудой ($C>2$ г/т), а также некондиционной рудной массой с содержанием 0,3–0,5 и 0,5–0,7 г/т. Автосамосвалы получают адрес разгрузки и везут минеральную массу на соответствующие внутрикарьерные промежуточные склады, находящиеся в непосредственной близости от грохотильно-дробильного перегрузочного пункта карьера, на котором осуществляется крупное грохочение горной массы с выделением на колосниках транспортабельных для ленточного конвейера кусков (–300 мм) в виде подрешетного продукта и крупнокускового материала (+300 мм), направляемого на дробление, после чего подготовленная к транспортировке горная масса поступает на ленточный конвейер.

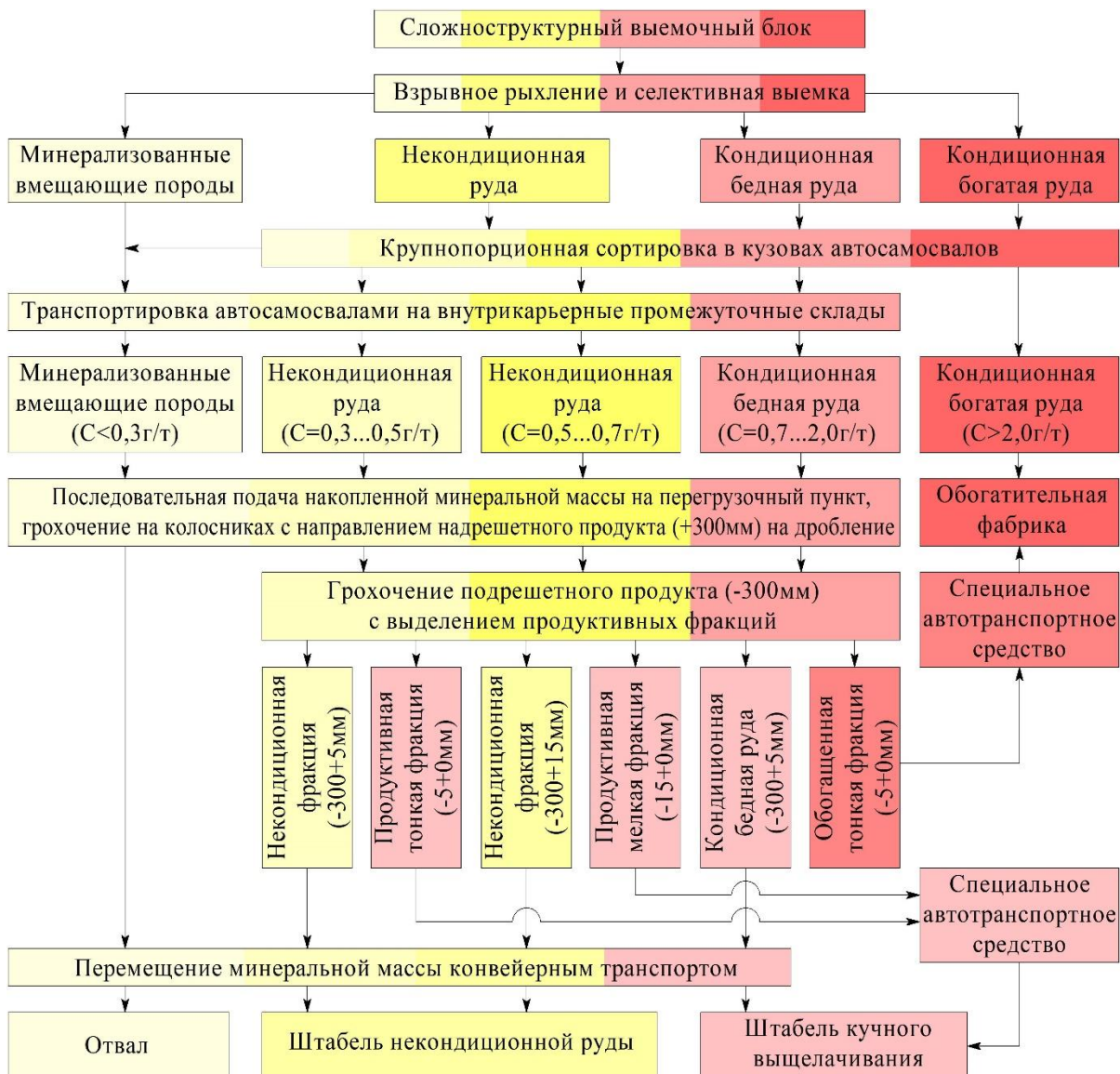


Рис. 2. Схема добычи и переработки с гибким управлением качеством минеральной массы
Fig. 2. Scheme of extraction and processing with flexible management of mineral mass quality

Для выделения из некондиционной рудной массы продуктивных фракций под колосниками предлагается разместить механический грохот с просеивающими поверхностями для среднего, мелкого и тонкого грохочения, а также накопительный бункер для сбора продуктивных фракций. Оставшиеся в качестве надрешетного продукта некондиционные фракции поступают по рудопуску в разгрузочный бункер дробилки и далее – на конвейер. Предлагается также при перегрузке кондиционной бедной руды выделять на механическом грохоте обогащенную тонкую фракцию, среднее содержание металла в которой ориентировочно будет составлять 2,5–3,0 г/т (согласно данным эксперимента класс крупности $(-5+0)$ мм в 2,2–2,3 раза обогащен металлом), и направлять ее на переработку на обогатительную фабрику вместе с кондиционной богатой рудой для

обеспечения более высокого извлечения металла. Продуктивные мелкая и тонкая фракции специальными транспортными средствами доставляются к месту проведения кучного выщелачивания, где после окомкования рудной мелочи $(-3+0)$ мм из них совместно с дробленной до крупности -15 мм кондиционной бедной рудой формируется штабель.

Ценность металла, извлекаемого при переработке полученных продуктивных мелкой и тонкой фракций, должна превышать затраты, связанные с выделением, транспортировкой и переработкой данного минерального сырья:

$$\Pi k_b (Q_m c_m E_m + Q_t c_t E_t) > 3 \cdot P,$$

где Π – цена полезного компонента; k_b – коэффициент извлечения полезного компонента из продук-

тивных фракций; Q_m , Q_t – доля, соответственно, мелкой и тонкой продуктивных фракции в объемах некондиционной руды с разным содержанием металла; c_m , c_t – средневзвешенное содержание полезного компонента в выделяемых соответственно мелкой и тонкой продуктивных фракциях; E_m , E_t – эффективность грохочения при выделении, соответственно, мелкой и тонкой продуктивных фракций; Z – затраты, связанные с выделением, транспортировкой и переработкой продуктивных фракций; P – уровень рентабельности производства.

Определение рациональных объемов мелкой и тонкой продуктивных фракций проводится с использованием результатов исследования по определению содержания металла в классах крупности взорванной некондиционной рудной массы, доставляемой на перегрузочный пункт, с включением в продуктивные фракции классов крупности с содержанием полезного компонента больше нижнего граничного значения, принятого для бедной руды. Доли продуктивных фракций в объеме некондиционной руды могут быть определены по формуле:

$$Q = \sum_{i=1}^n q_i,$$

где q_i – доля i -го класса крупности в объеме взорванной рудной массы; n – количество классов крупности с кондиционным содержанием полезного компонента.

Средневзвешенное содержание полезного компонента в продуктивных фракциях может быть определено по зависимости:

$$c = \frac{\sum_{i=1}^n (c_i q_i)}{\sum_{i=1}^n q_i},$$

где c_i – содержание полезного компонента в i -м классе крупности.

Проведены сравнительные расчеты показателей извлечения металла по предлагаемой и известной технологиям добычи и переработки для одного из сложноструктурных выемочных блоков рассматриваемого золоторудного месторождения. Обе технологии предполагают селективную выемку кондиционной богатой (КБР) и кондиционной бедной (КБР) руды, некондиционных руд (НР) и минерализованных вмещающих пород (МВП) с осуществлением последующей крупнопорционной сортировки рудной массы, транспортировку минерального сырья на внутрикарьерные промежуточные склады, последовательную подачу разнорудной минеральной массы на грохотильно-дробильный перегрузочный пункт с последующей транспортировкой конвейером. Отличие предлагаемой технологии от

известной состоит в разделении некондиционной руды по содержанию полезного компонента 0,3–0,5 и 0,5–0,7 г/т с выделением на дополнительно установленном грохоте продуктивных мелкой и тонкой фракций, объединяемых в дальнейшем в общую продуктивную фракцию (ПФ) с направлением на кучное выщелачивание, а некондиционной фракции (НФ) – на склад некондиционной руды. Также производится разделение на грохоте кондиционной бедной руды на обогащенную полезным компонентом тонкую фракцию (ТФ) и крупную фракцию кондиционной бедной руды (КФ) с их отдельной переработкой. Результаты расчетов представлены в таблице.

Таблица. Параметры извлечения золота из минеральной массы

Table. Metal extraction rates from mineral raw materials

Минеральная масса Mineral mass	Доля минеральной массы, % Share of mineral mass, %	Содержание золота, г/т Gold content, g/t	Доля золота в минеральной массе, % Gold proportion in mineral mass, %	Извлечение золота в конечный продукт, % Gold extraction into the final product, %	Доля извлеченного золота, % Share of extracted gold, %
Известная технология с отдельной переработкой минерального сырья Well-known technology with separate processing of mineral raw materials					
КБР/СРО	21,4	2,73	53,2	80	42,5
КБР/СРО	24,6	1,24	27,8	65	18,0
НР/СО	43,6	0,48	19,0	–	–
МВП/МНР	10,4	–	–	–	–
Итого/Total	100,0	1,10	100,0	–	60,5
Предлагаемая технология с отдельной переработкой минерального сырья Proposed technology with separate processing of mineral raw materials					
КБР/СРО	21,4	2,73	53,2	80	42,5
ТФ/ФФ	2,2	2,79	5,6	80	4,7
КФ/МФ	22,4	1,09	22,2	63	14,0
ПФ/ПФ	7,9	1,01	7,3	63	4,6
НФ/СФ	35,7	0,36	11,7	–	–
МВП/МНР	10,4	–	–	–	–
Итого/Total	100,0	1,10	100,0	–	65,8

CRO – conditioned rich ore, CPO – conditioned poor ore, SO – substandard ore, MHR – mineralized host rocks, FF – fine fraction, MF – major fraction, PF – productive fraction, SF – substandard fraction.

Таким образом, предлагаемая технология позволит увеличить извлечение металла из руд сложноструктурного выемочного блока на 5,3 % преимущественно за счет вовлечения в переработку продуктивных фракций некондиционной рудной массы.

Заключение

На основании полученных научных и практических результатов по вопросам повышения эффективности ведения открытых горных работ путем вовлечения в переработку некондиционного минерального сырья автором сделаны следующие выводы.

1. При ведении открытых горных работ образуется большое количество техногенных отходов, направляемых в отвалы вскрышных и минерализованных пород, а также штабели некондиционной руды, в которых может содержаться существенная доля металла, извлекаемого из недр. Так, в рассматриваемом сложноструктурном выемочном блоке исследуемого золоторудного месторождения в некондиционной руде содержится 19 % металла.
2. На основании анализа научно-технической литературы и собственных исследований отмечено, что на многих месторождениях цветных и благородных металлов для взорванной рудной массы характерно наличие повышенного содержания полезного компонента в мелкой и особенно в тонкой фракциях, в частности, проведенные с участием автора исследования золото-содержащей руды показали, что содержание металла в рудной мелочи (–15+10, –10+5 и –5+0 мм) в 1,38–2,30 раза превышает среднее содержание золота в пробах.
3. Выделение из всего объема некондиционной руды с содержанием 0,3–0,7 г/т продуктивной фракции одной крупности (–10+0 мм) приведет к тому, что при работе с рудной массой со средним содержанием около 0,6 г/т в продуктивную фракцию не будет вовлекаться класс крупности –15+10 мм с содержанием золота более 0,8 г/т, в то же время в рудной массе со средним содержанием порядка 0,4 г/т в продуктивную фракцию будет включен класс –10+5 мм с относительно низким содержанием металла (менее 0,6 г/т).
4. Предлагаемая технологическая схема с гибким управлением качеством выделяемых продуктивных фракций позволит увеличить содержание полезного компонента в дополнительно получаемом минеральном сырье, что в дальнейшем повысит извлечение металла при кучном выщелачивании и снизит себестоимость его получения.
5. Оснащение горохотильно-дробильного перегрузочного пункта дополнительным оборудованием, позволяющим выделять из рудной массы обогащенные полезным компонентом продуктивные фракции, даст возможность применительно к рассматриваемому выемочному блоку дополнительно вовлечь в переработку рудную массу, содержащую 7,3 % добываемого из недр металла, что позволит в 1,62 раза снизить потери золота со складываемыми некондиционными рудами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Архипов Г.И. Золотодобывающая промышленность Дальневосточного федерального округа: состояние и проблемы // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. – 2024. – № 1. – С. 41–52.
2. Инновационные технологии переработки упорных и бедных руд золота как основа рационального недропользования / Б.К. Михайлов, Г.В. Седелникова, Б.И. Беневольский, А.И. Романчук // Руды и металлы. – 2014. – № 1. – С. 5–8.
3. Голик В.И. Поэтапная комбинированная разработка золоторудных месторождений // Устойчивое развитие горных территорий. – 2024. – Т. 16. – № 1. – С. 368–378. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-1-368-378
4. Sánchez F., Hartlieb P. Innovation in the mining industry: technological trends and a case study of the challenges of disruptive innovation // Mining, Metallurgy & Exploration. – 2020. – Vol. 37 (5). – P. 1385–1399. DOI: 10.1007/s42461-020-00262-1.
5. Jarvie-Eggart M.E. Responsible mining: case studies in managing social & environmental risks in the developed world. – Colorado: Society for Mining, Metallurgy and Exploration, 2015. – 804 p.
6. Олейник Д.Н., Рыльникова М.В., Швабенланд Е.Е. Совершенствование правовых основ управления отходами недропользования в России // Рациональное освоение недр. – 2024. – № 6. – С. 24–35. DOI: 10.26121/RON.2023.74.6.001
7. Научное обоснование технологий комплексного ресурсосберегающего освоения месторождений стратегического минерального сырья / К.Н. Трубецкой, Д.Р. Каплунов, С.Д. Викторов, М.В. Рыльникова, Д.Н. Радченко // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2014. – № 12. – С. 5–12.
8. Комбинирование технологий выщелачивания с традиционными технологиями горного передела руд / Н.Г. Валиев, Ю.И. Разоренов, В.И. Голик, М.С. Лебзин // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2024. – № 4. – С. 33–43. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_4_0_33
9. Wu J., Ahn J., Lee J. Comparative leaching study on conicalcrite and chalcopryrite under different leaching systems // Korean Journal of Metals and Materials. – 2019. – Vol. 57 (4). – P. 245–250. DOI: 10.3365/KJMM.2019.57.4.245.
10. Золото в рудах золото-колчеданного месторождения Абыз (Центральный Казахстан) / А.К. Мазуров, А.Н. Николаева, М.А. Рудмин, Т.Ю. Якич, А.С. Рубан, Ш.Ж. Байболова // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 11. – С. 78–88. DOI: 10.18799/24131830/2021/11/3291
11. A transitional perspective of global and regional mineral material flows / Y. Baninla, M. Zhang, Y. Lu, R. Liang, Q. Zhang, Yu. Zhou, K. Khan // Resources, Conservation and Recycling. – 2019. – Vol. 140. – P. 91–101. DOI: 10.1016/j.resconrec.2018.09.014.
12. Струков К.И., Рыльникова М.В. Проблемы и перспективы развития «Южуралзолото Группа компаний» в условиях проявления глобальных вызовов // Горная промышленность. – 2021. – № 1. – С. 54–60. DOI: 10.30686/1609-9192-2021-1-54-60.
13. John, L.W. The art of heap of heap leaching-the fundamentals // Proceedings of Percolation Leaching: The Status Globally and in South Africa. – Africa: The Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 2011. – P. 17–20.

14. Ilankoon I.M.S.K., Tang Y., Ghorbani Y. The current state and future directions of percolation leaching in the Chinese mining industry: challenges and opportunities // *Minerals Engineering*. – 2018. – Vol. 125. – P. 206–222. DOI: 10.1016/j.mineng.2018.06.006.
15. Nieto A., Muncher B. An applied economic assessment and value maximization of a mining operation based on an iterative cut-off grade optimization algorithm // *International Journal of Mining and Mineral Engineering*. – 2021. – Vol. 12 (4). – P. 309–326. DOI: 10.1504/IJMMME.2021.121330.
16. Marsden J.O. Overview of gold processing techniques around the world // *Mining, Metallurgy & Exploration*. – 2006. – Vol. 23 (3). – P. 121–125. DOI: 10.1007/BF03403198.
17. Наимова Р.Ш. Перспективы использования вскрышных пород карьера Мурунтау в качестве резервного сырьевого источника // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2011. – № 3. – С. 117–122.
18. Optimisation of the leaching parameters of a gold ore in sodium cyanide solution / N. Hlabangana, S. Bhebbhe, N.G. Mguni et al. // *International Journal of Engineering Research and Reviews*. – 2018. – Vol. 6 (1). – P. 1–10.
19. Shirima J., Wikedzi A., Rasskazova A.V. Investigation of old waste dump composition of lean gold-bearing ores from the Golden Pride Project (GPP) mining operation in Nzega district, Tanzania // *Mining Science and Technology (Russia)*. – 2024. – Vol. 9 (1). – P. 5–11. DOI: 10.17073/2500-0632-2023-07-130.
20. Лагов В.С., Лагов П.В. Радиометрическая сортировка и сепарация твердых полезных ископаемых. – М.: Изд-во МИСИС, 2007. – 155 с.
21. Совершенствование технологии переработки вольфрамовых руд Холтосонского и Инкурского месторождений / А.В. Темнов, Л.П. Тигунов, В.К. Рябкин, Ю.А. Воеводин, В.Ф. Банников, И.Г. Луговская // *Разведка и охрана недр*. – 2013. – № 2. – С. 61–67.
22. Способ предварительного обогащения горнорудной массы при открытой разработке месторождений коренного золота: пат. № 2477181, Российская Федерация С1; заявл. 18.10.2011; опубл. 10.03.2013, Бюл. № 7. – 12 с.
23. Скорик Л.Ф., Павлов Н.А., Сацук А.С. О повышении эффективности системы управления качеством золотосодержащих руд // *Путь науки*. – 2017. – № 1. – С. 36–39.
24. Совершенствование схем добычи и переработки руд при освоении сложноструктурных месторождений / И.Ю. Рассказов, А.Ю. Чебан, Н.М. Литвинова, Т.Г. Конарева, А.С. Андрущенко // *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. – 2023. – № 2. – С. 57–67. DOI: 10.15372/FTPRI20230206.
25. Чебан А.Ю. Технология складирования некондиционных руд с выделением продуктивных мелких фракций // *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*. – 2024. – № 1. – С. 388–398.
26. Корнилов С.В., Титов Р.С. Оптимизация параметров карьерных грохотильно-перегрузочных пунктов для выделения продуктивных фракций минерального сырья // *Проблемы недропользования*. – 2023. – № 3 (38). – С. 36–46. DOI: 10.25635/2313-1586.2023.03.036.
27. Совершенствование логистической схемы Светлинского рудника при переходе на циклично-поточную технологию / А.Г. Шадронов, С.А. Саблев, И.А. Пыталев, О.В. Фридрихсон // *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*. – 2020. – № 4. – С. 535–547.
28. Lucio J.C., Senra C.T., Souza. A. Paving the future – a case study replacing truck-and-shovels by shovel-and-conveyor continuous mining at Carajas open pit mines // *IronOre 2009 Conference*. – Perth, WA, July 27–29, 2009. – P. 269–276.
29. Minkin A., Wolpers F.M., Hellmuth T. Overcoming a mines embankment: IPCG system with new belt conveying concept for steep opencast minewalls // *Bulk Solids Handling*. – 2019. – Vol. 37 (2). – P. 18–23.
30. Мальгин О.Н., Кустов А.М., Коломников С.С. Развитие циклично-поточной технологии в транспортной системе карьера «Мурунтау» // *Горный журнал*. – 2007. – № 5. – С. 33–37.

Информация об авторе

Антон Юрьевич Чебан, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории геотехнологии и горной теплофизики, Институт горного дела Дальневосточного отделения Российской академии наук, Россия, 680000, г. Хабаровск, ул. Тургенева, 51; echebanay@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2707-626X>

Поступила в редакцию: 06.09.2024

Поступила после рецензирования: 24.09.2024

Принята к публикации: 21.04.2025

REFERENCES

1. Arkhipov G.I. The gold mining industry of the Far Eastern federal district: the state and problems. *Mineral Recourses of Russia. Economics And Management*, 2024, no. 1, pp. 41–52. (In Russ.)
2. Mikhailov B.K., Sedelnikova G.V., Benevolsky B.I., Romanchuk A.I. Innovative technologies for processing refractory and lean gold ores as a basis for rational subsoil use. *Ores and metals*, 2014, no. 1, pp. 5–8. (In Russ.)
3. Golik V.I. Phased combined development of gold ore deposits. *Sustainable development of mountain territories*, 2024, vol. 16, no. 1, pp. 368–378. (In Russ.) DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-1-368-378.
4. Sánchez F., Hartlieb P. Innovation in the mining industry: technological trends and a case study of the challenges of disruptive innovation. *Mining, Metallurgy & Exploration*, 2020, vol. 37, no. 5, pp. 1385–1399. DOI 10.1007/s42461-020-00262-1/
5. Jarvie-Eggart M.E. *Responsible mining: case studies in managing social & environmental risks in the developed world*. Colorado, Society for Mining, Metallurgy and Exploration, 2015. 804 p.
6. Oleynik D.N., Rylnikova M.V., Shvabenland E.E. Improving the legal framework for the mining wastemanagement in Russia. *Rational development of subsoil*, 2024, no. 6, pp. 24–35. (In Russ.) DOI: 10.26121/RON.2023.74.6.001.

7. Trubetskoy K.N., Kaplunov D.R., Viktorov S.D., Rylnikova M.V., Radchenko D.N. Scientific rationale of technologies for comprehensive resource-saving exploitation of strategic mineral resources. *Mining Informational and Analytical Bulletin*, 2014, no. 12, pp. 5–12. (In Russ.)
8. Valiev N.G., Razorenov Yu.I., Golik V.I., Lebzin M.S. Combination of leaching technologies with conventional ore processing techniques. *Mining information and analytical bulletin*, 2024, no. 4, pp. 33–43. (In Russ.) DOI: 10.25018/0236_1493_2024_4_0_33.
9. Wu J., Ahn J., Lee J. Comparative leaching study on conicalcrite and chalcopryrite under different leaching systems. *Korean Journal of Metals and Materials*, 2019, vol. 57, no. 4, pp. 245–250. DOI: 10.3365/KJMM.2019.57.4.245.
10. Mazurov A.K., Nikolaeva A.N., Rudmin M.A., Yakich T.Yu., Ruban A.S., Baibolova Sh.Zh. Gold in the ore of the gold-pyrite deposit Abyz (Central Kazakhstan). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 11, pp. 78–88. (In Russ.) DOI: 10.18799/24131830/2021/11/3291.
11. Baninla Y., Zhang M., Lu Y., Liang R., Zhang Q., Zhou Yu., Khan K. A transitional perspective of global and regional mineral material flows. *Resources, Conservation and Recycling*, 2019, vol. 140, pp. 91–101. DOI: 10.1016/j.resconrec.2018.09.014.
12. Strukov K.I., Rylnikova M.V. Issues and prospects for the development of Uzhuralzoloto group of companies in conditions of global challenges. *Mining Industry Journal*, 2021, no. 1, pp. 54–60. (In Russ.) DOI: 10.30686/1609-9192-2021-1-54-60.
13. John L.W. The art of heap of heap leaching-the fundamentals. *Proc. of Percolation Leaching: The Status Globally and in South Africa*. Africa, The Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 2011. pp. 17–20.
14. Ilankoon I.M.S.K., Tang Y., Ghorbani Y. The current state and future directions of percolation leaching in the Chinese mining industry: Challenges and opportunities. *Minerals Engineering*, 2018, vol. 125, pp. 206–222. DOI: 10.1016/j.mineng.2018.06.006
15. Nieto A., Muncher B. An applied economic assessment and value maximization of a mining operation based on an iterative cut-off grade optimization algorithm. *International Journal of Mining and Mineral Engineering*, 2021, vol. 12 (4), pp. 309–326. DOI: 10.1504/IJMM. 2021.121330
16. Marsden J.O. Overview of gold processing techniques around the world. *Mining, Metallurgy & Exploration*, 2006, vol. 23 (3), pp. 121–125. DOI: 10.1007/BF03403198.
17. Naimova R.Sh. Prospects for the use of overburden rocks of the Muruntau quarry as a reserve source of raw materials. *Mining Information and Analytical Bulletin*, 2011, no. 3, pp. 117–122. (In Russ.)
18. Hlabangana N., Bhebe S., Mguni N.G. Optimisation of the leaching parameters of a gold ore in sodium cyanide solution. *International Journal of Engineering Research and Reviews*, 2018, vol. 6 (1), pp. 1–10.
19. Shirima J., Wikedzi A., Rasskazova A.V. Investigation of old waste dump composition of lean gold-bearing ores from the Golden Pride Project (GPP) mining operation in Nzega district, Tanzania. *Mining Science and Technology (Russia)*, 2024, vol. 9 (1), pp. 5–11. DOI: 10.17073/ 2500-0632-2023-07-130
20. Lagov V.S., Lagov P.V. *Radiometric sorting and separation of solid minerals*. Moscow, MISIS Publ. House, 2007. 155 p. (In Russ.)
21. Temnov A.V., Tigunov L.P., Ryabkin V.K., Voevodin Yu.A., Bannikov V.F., Lugovskaya I.G. Improvement of the technology of processing of tungsten ores the Holtoson and Inkur deposits. *Exploration and Protection of Subsoil*, 2013, no. 2, pp. 61–67. (In Russ.)
22. Lobanov N.F., Kamnev E.N., Kasatkin V.V., Latyshev V.E., Sytenkov V.N., Eremin A.M., Potapov V.A., Filippov S.A. *Method for preliminary enrichment of ore mass in open-pit mining of primary gold deposits*. Patent RF, no. 2477181, 2013. (In Russ.)
23. Skorik L.F., Pavlov N.A., Satsuk A.S. On raising efficiency of quality control system for gold ores. *The Way of Science*, 2017, no. 1, pp. 36–39. (In Russ.)
24. Rasskazov I.Yu., Cheban A.Yu., Litvinova N.M., Konareva T.G., Andryushchenko A.S. Improvement of mining and processing flowsheets at structurally complex ore deposits. *Fiziko-Tekhnicheskiye Problemy Razrabotki Poleznykh Iskopaemykh*, 2023, no. 2, pp. 57–67. (In Russ.) DOI: 10.15372/FTPRPI20230206.
25. Cheban A.Yu. Technology for storage of sub-specific ores with separation of productive fine fractions. *Bulletin of the Tula State University. Sciences and the Earth*, 2024, no. 1, pp. 388–398. (In Russ.)
26. Kornilkov S.V., Titov R.S. Parameter optimization for quarry routing and reloading points for the allocation of productive fractions of mineral raw materials. *Problems of subsoil use*, 2023, no. 3, pp. 36–46. (In Russ.) DOI: 10.25635/2313-1586.2023.03.036.
27. Shadrinov A.G., Sablev S.A., Pytalev I.A., Fridrikhson O.V. Improvement of the Svetlinsky gold deposit logistics scheme with transition to cycle-flow technology. *Bulletin of the Tula State University. Sciences and the Earth*, 2020, no. 4, pp. 535–547. (In Russ.)
28. Lucio J.C., Senra C.T., Souza A. Paving the future – a case study replacing truck-and-shovels by shovel-and-conveyor continuous mining at Carajas open pit mines. *IronOre 2009 Conference*. Perth, WA. July 27–29, 2009. pp. 269–276.
29. Minkin A., Wolpers F.M., Hellmuth T. Overcoming a mines embankment: IPCG system with new belt conveying concept for steep opencast minewalls. *Bulk Solids Handling*, 2019, vol. 37 (2), pp. 18–23.
30. Malgin O.N., Kustov A.M., Kolomnikov S.S. Development of the cyclic and continuous flow technology in transportation system of Muruntau quarry. *Mining magazine*, 2007, no. 5, pp. 33–37. (In Russ.)

Information about the author

Anton Yu. Cheban, Cand. Sc., Leading Researcher, Institute of Mining of Far East Branch of the Russian Academy of Sciences, 51, Turgenev street, Khabarovsk, 680000, Russian Federation; chebanay@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2707-626X>

Received: 06.09.2024

Revised: 24.09.2024

Accepted: 21.04.2025

УДК 661.481.7(661.666.1)
DOI: 10.18799/24131830/2025/7/5070
Шифр специальности ВАК 2.6.8; 2.6.17
Научная статья

Исследования углеродных материалов и их ресурсные испытания в качестве анодов при производстве фтора

В.Л. Софронов✉, С.А. Ткачук, А.Н. Жиганов, С.А. Житков

Северский технологический институт – филиала Национального исследовательского ядерного
университета «МИФИ», Россия, г. Северск

✉ vlsufronov@mephi.ru

Аннотация. Актуальность. На сегодняшний день основным промышленным способом получения фтора является электролиз фтороводорода из расплавов гидрофторидов калия. При этом чаще всего используют среднетемпературные (до 105 °С) электролизеры с электролитом состава $KF \cdot 2HF$, рассчитанные на силу тока до 40 кА, в которых основополагающими элементами являются жалюзийный стальной катод и коксовый анод. Единственное оставшееся российское предприятие, производящее коксовые пластины, пригодные для использования в качестве анодов при электрохимическом производстве фтора (АО «Донкарб Графит») с целью снижения их стоимости, стало применять вместо нефтяных каменноугольные кокс и пек, что привело к существенному снижению качества и срока их работы. Поэтому существует необходимость поиска и разработки новых более устойчивых во фторидных средах анодных материалов. **Цель.** Оценка различных новых углеродсодержащих материалов, пригодных для изготовления анодных пластин и электрохимического производства фтора, проведение ресурсных испытаний данных материалов в непрерывном режиме в течение продолжительного времени (до 3360 часов). **Методы.** Технические условия, кажущуюся плотность, предел прочности на сжатие, содержание золы, пористость и удельное электросопротивление материалов композиционных коксовых пластин определяли согласно ГОСТ 23775-79, 22692-77, 22898-78, 23776-79. **Объект.** Материалы на основе коксо-пековых соединений, углерод-углеродные композиционные материалы. **Результаты.** В условиях получения фтора проведены исследования и ресурсные испытания ряда новых композиционных материалов на основе углерода, разработанных ООО «Научно-технологический центр углеродных и композиционных материалов» (г. Челябинск) и Северским технологическим институтом – филиалом национального исследовательского ядерного университета «МИФИ». При этом определены следующие физико-механические и физико-химические свойства композиционных материалов: кажущаяся плотность, предел прочности на сжатие, содержание золы, пористость и удельное электрическое сопротивление. Сформированы рекомендации для дальнейших производственных испытаний ряда новых материалов.

Ключевые слова: фтор, коксовые пластины, композиционные материалы, пироуплотнение, технические характеристики, ресурсные испытания

Для цитирования: Исследования углеродных материалов и их ресурсные испытания в качестве анодов при производстве фтора / В.Л. Софронов, С.А. Ткачук, А.Н. Жиганов, С.А. Житков // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 7. – С. 125–132. DOI: 10.18799/24131830/2025/7/5070

UDC 661.481.7(661.666.1)
DOI: 10.18799/24131830/2025/7/5070
Scientific paper

Carbon materials and their resource tests as anodes in fluorine production

V.L. Sofronov✉, S.A. Tkachuk, A.N. Zhiganov, S.A. Zhitkov

Seversk Technological Institute – branch of the National Research Nuclear University «MEPhI»,
Seversk, Russian Federation

✉ vlsufronov@mephi.ru

Abstract. Relevance. Today, the main industrial method for producing fluorine is the electrolysis of hydrogen fluoride from potassium hydrofluoride melts. Most often, they use the medium-temperature (up to 105°C) electrolyzers with a $KF \cdot 2HF$ electrolyte designed for a current of up to 40 kA, in which the fundamental elements are a louvered steel cathode and a coke anode. The only remaining Russian enterprise producing coke plates suitable for use as anodes in the electrochemical production of fluorine (JSC Donkarb Graphite) began to use coal coke and pitch instead of petroleum coke and pitch in order to reduce their cost. This led to a significant decrease in their quality and service life. Therefore, there is a need to search for and develop new anode materials that are more stable in fluoride environments. **Aim.** Evaluation of various new carbon-containing materials suitable for manufacturing anode plates and electrochemical production of fluorine, carrying out resource tests of these materials in a continuous mode for various periods of time (up to 3360 hours). **Methods.** Technical conditions, apparent density, compressive strength, ash content, porosity and specific electrical resistance of composite coke plate materials were determined according to SS 23775-79, 22692-77, 22898-78, 23776-79. **Object.** Materials based on coke-pitch compounds, carbon-carbon composite materials. **Results.** Under conditions of fluorine obtaining the authors have conducted the research and resource testing of a number of new carbon-based composite materials developed by the Scientific and Technological Center of Carbon and Composite Materials (Chelyabinsk) and the Seversk Technological Institute, a branch of the National Research Nuclear University MEPhI. They determined the following physical, mechanical and physical and chemical properties of the composite materials: apparent density, compressive strength, ash content, porosity and specific electrical resistance. The paper introduces the recommendations for further production testing of a number of new materials.

Keywords: fluorine, coke plates, composite materials, pyrocompaction, technical characteristics, resource testing

For citation: Sofronov V.L., Tkachuk S.A., Zhiganov A.N., Zhitkov S.A. Carbon materials and their resource tests as anodes in fluorine production. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 7, pp. 125–132. DOI: 10.18799/24131830/2025/7/5070

Введение

Фтор является одним из ключевых агентов в современной ядерной технологии, с его помощью получают один из основных продуктов ядерной технологии – гексафторид урана. В производственных условиях фтор получают среднетемпературным электролизом расплава, который образуется при насыщении дигидрофторида калия ($KF \cdot 2HF$) фтороводородом до содержания 36–43 % HF . При этом в качестве анодов используют коксовые пластины. От качества этих пластин существенно зависит производительность и продолжительность межремонтной работы фторных электролизеров, величина разности потенциалов на электролизере, последняя в свою очередь определяет скорость и степень электрохимической коррозии элементов конструкции и соответственно накопление продуктов коррозии конструкционных материалов в электролите, что также приводит к увеличению разности потенциалов на электролизере [1–4].

В России и в мире производится большое количество различных типов коксовых (угольных) пластин, которые применяют не только в технологии фтора, но и при получении алюминия и других металлов [5, 6]. Существенным недостатком угольных анодов является их склонность к поляризации, анодному эффекту, когда происходит резкий рост напряжения на электролизере (до 50–60 В) и одновременное уменьшение силы тока. Эксплуатационная стойкость анодов определяется в основном структурой и природой материала кокса нефтяного или угольного, связки – пека нефтяного или угольного, а также технологий изготовления анодов.

Для изготовления коксовых пластин как российские, так и зарубежные предприятия используют

каменноугольный или нефтяной кокс и пеки. Лучшие результаты получаются при использовании в качестве основы для анодных электродов нефтяных кокса и пека.

В работах [7–9] нами представлены результаты комплексных сравнительных исследований структуры и химического состава коксовых пластин ряда российских и зарубежных производителей с использованием различных физико-химических методов анализа (рентгеноструктурный и рентгенофазовый, термогравиметрический, спектральный и т. д.) с целью проверки возможности их использования для изготовления анодов для фторных электролизеров.

В работах показано, что по основным показателям, таким как плотность, пористость, зольность, удельное электрическое сопротивление, прочность на сжатие, коксовые пластины фирм Германии, Франции, Японии и Китая практически не отличаются от требований российского ТУ 48-12-34-95 («Пластины коксовые обожженные»), а по продолжительности межремонтного цикла в производстве фтора даже им уступают. Основными недостатками всех исследованных материалов являются их высокие пористость и удельное электрическое сопротивление.

В настоящее время российское предприятие, производящее коксовые пластины, пригодные для производства фтора (АО «Донкарб Графит»), с целью снижения их стоимости стало использовать каменноугольные кокс и пек [9], что привело к снижению их качества, поэтому актуальным является вопрос поиска и разработки новых более устойчивых во фторидных средах анодных матери-

алов с улучшенными эксплуатационными свойствами (снижение пористости и удельного электрического сопротивления, увеличение прочностных характеристик) для увеличения ресурса их работы до 15–20 тыс. часов и более.

Материалы для исследования и технологии получения

При подборе материалов для исследования исходили из следующих требований:

- 1) химическая стойкость в среде расплава электролита $KF \cdot 2HF$ и газообразных фтороводорода и фтора;
- 2) минимально возможная открытая пористость, а также более высокая, чем у пластин «Донкарб Графит», плотность, электропроводность и прочность.

Информация об исследованных материалах приведена в табл. 1. Коксовые пластины фирмы «Донкарб Графит» рассматривали для сравнения как базовый материал.

Коксовые пластины «Донкарб Графит» (пластины № 1) изготовлены по классической порошковой технологии [10, 11]. Технология включает следующие основные стадии: измельчение и классификацию материалов; первичную пропитку пеком, формование, прессование заготовок и первичный обжиг; повторную пропитку связующим, повторный обжиг и механическую обработку.

Коксовые пластины ООО «НТЦ УКМ» (пластины № 2) изготовлены по классической порошковой технологии [10, 11]. Отличие заключалось лишь в том, что для повышения физико-механических свойств пластин в качестве связующего материала кроме нефтяного пека введен стеклоглерод и 3–5 мас. % ультрадисперсной меди. Пластины были покрыты также пиролитическим углеродом.

Углерод-углеродный композиционный материал (пластина № 3) в работе получали осаждением из газовой фазы пироуглерода, образующегося при термическом разложении метана, при температуре 1100–1200 °С и армировали углеродными волокна-

ми из ткани Урал ТМ-4-22 СТБ 995-2011 производства ОАО «Светлогорскимволокно» (Республика Беларусь), затем снаружи герметизировали плотным слоем пироуглерода по технологии, разработанной в [12]. Углерод-углеродные композиционные материалы имеют высокую стойкость в агрессивных средах и повышенных температурах, а также эрозионную и радиационную стойкость.

Коксовую пластину № 4 изготовили из игольчатого нефтяного кокса – это высокоструктурированный углеродный продукт с низким содержанием металлов и серы. Он, на наш взгляд, должен придать электродам специальные свойства, такие как высокие электропроводность и прочность. В работах, посвященных совершенствованию технологии коксовых пластин [11, 12], игольчатый кокс упоминается как материал, благодаря которому должна существенно снизиться вероятность разрушения анодов в процессе электролиза при условии обеспечения основных параметров в технологии производства коксовых анодов. Углеродные волокна также используют в качестве армирующего каркаса для различных углеродных материалов. Для исследований использовали игольчатый кокс марки А производства Омского НПЗ и каменноугольный пек марки В производства ООО «Донкарб Графит».

Коксовые пластины изготовили по классической порошковой технологии. При этом игольчатый кокс измельчали и отбирали фракцию (–100) мкм, проводили его обжиг по режиму, приведенному на рис. 1, смешивали порошки кокса и пека фракций (–100) мкм в массовом соотношении 75:25, прессовали при давлении 0,5 т/см² и проводили повторную термообработку при температуре 600 °С.

Коксовую пластину № 5 изготовили из коксовой пластины ООО «Донкарб Графит» и дополнительно её армировали тканью, полученной из тонких углеродных нитей диаметром 5–10 мкм производства «Юматекс» ГК «Росатом» с последующей пропиткой каменноугольным пеком и повторным обжигом.

Таблица 1. Образцы исследуемых материалов

Table 1. Samples of the materials researched

Изготовление Manufacturing	ООО «Донкарб Графит», г. Челябинск Donkarb Graphite LLC, Chelyabinsk	ООО «НТЦ УКМ» ¹ , г. Челябинск LLC «NTC UKM» ¹ , Chelyabinsk	Северского технологического института – филиала Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Северск Seversk Technological Institute – branch of the National Research Nuclear University «MEPhI», Seversk		
№	1	2	3	4	5
Марка, основа материала Brand, material basis	«Донкарб», КПТ ^м «Donkarb», KPT ^m	УКМ-1, КПТ UKM-1, KPT	СТИ-1, пруток, ткань ТМ-4-22 СТБ 995-2011 STI-1, rod, fabric ТМ-4-22 STB 995-2011	СТИ-2, игольчатый кокс STI-2, needle coke	СТИ-3, углетканевый STI-3, carbon-fiber

Примечание: «НТЦ УКМ»¹ – Научно-технический центр. Углеродные композиционные материалы; КПТ^м – классическая порошковая технология.

Notes: «NTC UKM»¹ – Scientific and technical center. Carbon composite materials; KPT^m – classical powder technology.

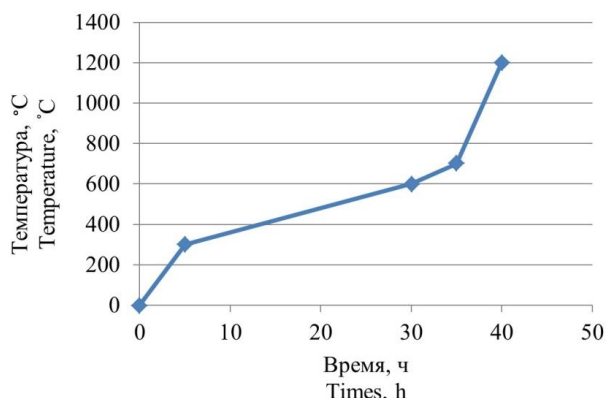


Рис. 1. Режим термообработки (обжига) коксовых пластин

Fig. 1. Heat treatment (roasting) mode of coke plates

Результаты экспериментов и обсуждение

Свойства материалов анодных пластин. Характеристики коксовых пластин (КП) установлены согласно ТУ 48-12-34-95 – Пластины коксовые обожжённые. Технические условия, кажущуюся плотность, предел прочности на сжатие, содержание золы, пористость и удельное электросопротивление материалов композиционных коксовых пластин определяли по методикам, приведенным в соответствующих государственных стандартах: ГОСТ 23775-79, 22692-77, 22898-78 и 23776-79. При этом были проанализированы не менее трех пластин каждой марки, каждый анализ повторяли не менее трех раз. В работах [13–19] для определения качества пластин предлагают использовать методы физико-механического, химического и физико-химического анализа, такие как ДТА, РСА, АЭС и СЭМ [13]. Статистическую обработку опытных данных проводили по методике, приведенной в ОСТ 95 10353-2008 – Отраслевая система обеспечения единства измерений.

Плотности пластин из композиционных материалов (№ 2, 3) выше, а пластин (№ 4, 5) ниже, чем плотность стандартных пластин (Донкарб); пористости пластин из композиционных материалов (№ 2, 3) в 3–4 раза ниже, чем пористости пластин (Донкарб) и СТИ (пластины 4 и 5); прочности на сжатие пластин

из композиционных материалов (№ 2, 3) значительно выше, чем прочности пластин (Донкарб) и СТИ (пластины 4 и 5); удельные электрические сопротивления пластин из композиционного материала СТИ-1 (пластина № 3) в 2–2,5 раза ниже, чем удельные электрические сопротивления всех остальных пластин; зольности всех пластин, за исключением пластины УКМ-1, практически одинаковы.

Таким образом, из проведенных исследований следует, что свойства рассмотренных материалов в основном достаточно близки за исключением более низкой пористости и удельного электрического сопротивления, а также более высокой прочности композиционных пластин СТИ-1. С целью оценки пригодности этих материалов для использования в качестве анодов при электрохимическом производстве фтора нами были проведены ресурсные испытания.

Ресурсные испытания анодных пластин. Испытания образцов анодных композиционных материалов проводили на лабораторной установке, представленной на рис. 2.

Установка состояла из десяти электролизеров, которые имели независимые подключения и управление (рис. 3). В качестве ванны электролизера использовали фторопластовый стакан с закручивающейся крышкой объемом 1000 см³, в котором плавил электролит KF·2HF, предварительно насыщенный фтороводородом, массой 1800 г. Материал катода Ст3, рабочие площади анода и катода составляли 4,1 см², межэлектродное расстояние – 45 мм. В крышке просверлены три отверстия для защитного чехла термопары, анода и катода. Вывод фтора и водорода из электролизера не предусмотрен, и газы, соответственно, поступают в общее пространство над электролитом, в котором превращаются снова во фтороводород.

Процесс электролиза проводили при температуре 95–100 °C, напряжении 5,8–8,5 В, плотности тока 0,2 А/см². Исходные содержания фтороводорода, железа и никеля в электролите по данным химических анализов соответственно составили: [HF]=41,06 %; [Fe]=0,008 %; [Ni]=0,005 мас. % [20].

Таблица 2. Технические характеристики коксовых пластин различных производителей

Table 2. Technical characteristics of coke plates from various manufacturers

Марка и № пластин Brand and plate no.	Плотность, г/см ³ Density, g/cm ³	Пористость, % Porosity, %	Зольность, % Ash content, %	Удельное электрическое сопротивление, мкОм·м Specific electrical resistance, μOhm·m	Прочность на сжатие, МПа Compressive strength, MPa
ТУ 48-12-34-95. Пластины коксовые TU 48-12-34-95. Coke plates	не менее not less than 1,64	не более no more than 21	не более no more than 0,6	не более no more than 25-40	не менее not less than 58,8
Донкарб/Donkarb, № 1	1,65±0,01	19,3±0,3	0,37±0,01	40,0±0,2	64,9±6,9
УКМ-1/UKM-1, № 2	1,95±0,05	6,0±2,0	0,60±0,10	34,0±3,3	103,0±10,0
СТИ-1/STI-1, № 3	1,78±0,02	5,1±0,3	0,28±0,11	15,0±0,3	105,3±9,3
СТИ-2/STI-2, № 4	1,42±0,04	20,0±0,6	0,27±0,03	39,2±0,8	73,1±4,5
СТИ-3/STI-3, № 5	1,32±0,04	25,0±0,3	0,28±0,03	45,0±2,2	44,9±6,9

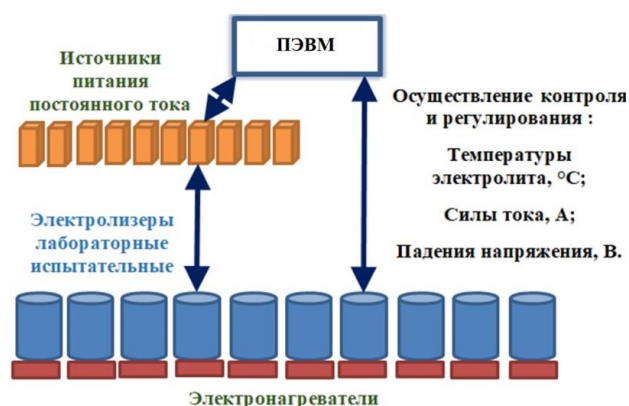


Рис. 2. Схема лабораторной установки для испытаний образцов анодных материалов

Fig. 2. Schematic diagram of a laboratory setup for testing samples of anode materials

Фторопластовые стаканы устанавливали на электроплитки, которые подогревали электролит. Регулировку температуры электролита выполняли терморегулятором ТРМ500 в димером, который ограничивает напряжение питания электроплитки. Электропитание электролизеров осуществляли источником питания постоянного тока МСН-K305D в режиме стабилизации силы тока.

Снятие анодных эффектов, возникающих при электролизе, осуществляли путем повышения напряжения питания до 50 В и тока до 4 А в течение 2 с. Методика проведения исследований процесса электролитического получения фтора и анализов исходных и конечных продуктов более подробно приведена в работе [4].

Экспериментальные данные, полученные при исследовании электролитического производства фтора, представлены в табл. 3.

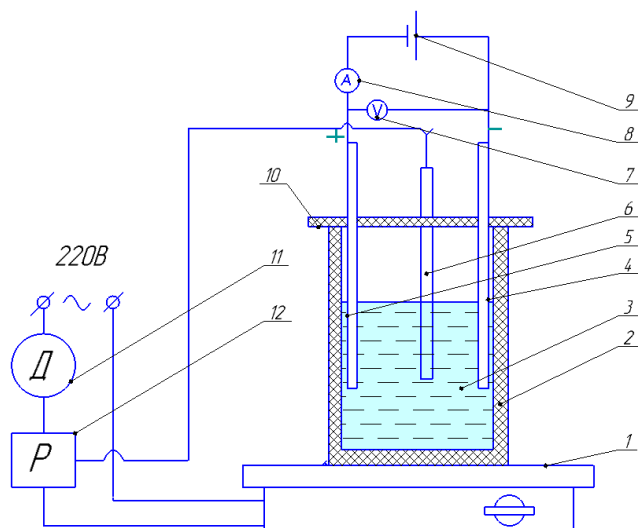


Рис. 3. Схема установки электролитического получения фтора: 1 – плитка; 2, 10 – стакан и крышка тефлоновые; 3 – электролит; 4 – катод; 5 – анод; 6 – термопара; 7 – вольтметр; 8 – амперметр; 9 – источник постоянного тока МСН-K305D; 11 – тиристорный регулятор мощности; 12 – регулятор температуры ТРМ500

Fig. 3. Schematic diagram of the electrolytic fluorine production unit: 1 – hotplate; 2, 10 – tefflon glass and lid; 3 – electrolyte; 4 – cathode; 5 – anode; 6 – thermocouple; 7 – voltmeter; 8 – ammeter; 9 – DC source MSN-K305D; 11 – thyristor power regulator; 12 – TRM500 temperature regulator

Таблица 3. Результаты ресурсных испытаний образцов анодных материалов

Table 3. Results of resource tests of anode material samples

№ пластины и характеристика анода Plate no. and anode characteristics	t , ч/h	i_{ay} , А/см ² A/cm ²	$U_{вн}$, В/V	$U_{к}$, В/V	Анодные эффект, шт/pcs	Состояние анода к концу испытаний Anode condition at the end of the tests	Рекомендация для применения Recommendation for use
№ 1, 000 «Донкарб Графит» по ТУ 48-12-34-95 стандартный «Donkarb Graphite» according to TU 48-12-34-95 standard	3360	0,2	5,8	7,4	11	хорошее good condition	+
№ 2, 000 «НТЦ УКМ», г. Челябинск LLC «NTC UKM», Chelyabinsk	3360	0,2	5,8	8,5	11		+
№ 3, пруток УУКМ Ткань ТМ-4-22 СТБ 995-2011 rod UUKM Fabric TM-4-22 STB 995-2011	3360	0,2	5,8	7,4	12		+
№ 4, Анод из игольчатого кокса Needle coke anode	432	0,2	6,16	6,18	2	плохое bad condition	–
№ 5, Анод-магниева пластина с углетканевым покрытием Anode-magnesium plate with carbon fabric coating	5	0,2	6,3	6,3	–		–

Примечания: Поверхность анода № 4 стала рыхлой и осыпалась; произошло нарушение контакта между магниевой пластиной и углетканевым покрытием анода № 5.

Note: Surface of anode no. 4 became loose and crumbled; contact between the magnesium plate and the carbon fabric coating of anode no. 5 was disrupted.

Следующие образцы выдержали ресурсные испытания, которые продолжались в течение 3360 ч, наряду с образцом по ТУ 48-12-34-95 (Донкарб):

- 1) образцы из углерод-углеродного композиционного материала, уплотненные плотным слоем пироуглерода (пластина № 3, СТИ-1);
- 2) анодные коксовые композитные пластины УКМ (пластина № 2, ООО «НТЦ УКМ», г. Челябинск).

Поэтому они могут быть рекомендованы для дальнейшей проверки в производственных условиях.

Заключение

Проведены исследования технологических свойств образцов композиционных и коксовых пластин, разработанных ООО «НТЦ УКМ», (г. Челябинск) и СТИ «НИЯУ МИФИ» (г. Северск), из различных материалов, необходимых при использовании в качестве анодов в электрохимическом производстве фтора: кажущаяся плотность, предел прочности на сжатие, содержание золы, пористость

и удельное электросопротивление. Установлено, что свойства исследованных материалов в основном достаточно близки к свойствам базового анодного коксового материала марки «Донкарб Графит», который в настоящее время используется в производстве фтора, за исключением более низкой пористости, удельного электрического сопротивления и более высокой прочности композиционных пластин производства ООО «НТЦ УКМ», (г. Челябинск) и СТИ «НИЯУ МИФИ».

Ресурсные испытания, проведенные для оценки пригодности материалов, использованных в качестве анодов при электрохимическом производстве фтора, показали, что пластины СТИ-1 (пластины № 3), изготовленные из углерод-углеродных композиционных материалов, пропитанных пироуглеродом, а также пластины УКМ (пластины № 2), изготовленные из композиционных материалов на ООО «НТЦ УКМ», можно рекомендовать для дальнейших производственных испытаний в условиях получения фтора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Корнилов В.В. Ретроспективный анализ и прогноз развития некоторых отраслей фторхимической промышленности // Online journal «Fluorine notes». – 2024. – Т. 157. – № 6. – С. 1–21. URL: http://ru.notes.fluorine1.ru/public/2024/6_2024/article_2.html (дата обращения 15.01.2025).
2. Беляев В.М. Механизм и кинетика электродных процессов при электролизе расплава $KF \cdot nHF$ // Известия Томского политехнического университета. – 2003. – Т. 306. – № 6. – С. 85–90. URL: <https://elibrary.ru/hpoptj> (дата обращения 15.01.2025).
3. Leech H.R. Laboratory and technical production of fluorine and its compounds // Quarterly Reviews, Chemical Society. – 1949. – Vol. 22. – № 3. – P. 22–35. DOI: 10.1039/QR9490300022.
4. Исследование вольт-амперных характеристик процесса получения фтора методом среднетемпературного электролиза / В.Л. Софронов, С.А. Житков, Ю.Н. Макаеев, С.А. Ткачук // Вестник Томского государственного университета. Химия. – 2024. – № 36. – С. 81–89. DOI: <https://doi.org/10.17223/24135542/36/6>.
5. Нефтяной кокс для алюминиевой промышленности. Технология и свойства / В.П. Твердохлебова, С.А. Храменко, Ф.А. Бурюшкина, И.В. Павлова // Журнал Сибирского федерального университета. Химия. – 2010. – Т. 3. – № 4. – С. 369–386. URL: <https://elibrary.ru/neusxv> (дата обращения 15.01.2025).
6. Влияние свойств нефтяного кокса на эксплуатационные характеристики обожженных анодов для производства алюминия / А.Г. Золотова, В.Ф. Петрова, И.В. Карташова, Д.М. Вдовенко // Известия Волгоградского государственного технического института. – 2023. – Т. 281. – № 10. – С. 33–39. DOI: <https://doi.org/10.35211/1990-5297-2023-10-281-33-39>.
7. Сырьевая база и перспективы производства фтора в России / В.Л. Софронов, О.Г. Жеронкина, К.В. Холина и др. // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2013. – Т. 56. – № 4/2. – С. 114–123. URL: <https://elibrary.ru/qzxiqh> (дата обращения 15.01.2025).
8. Софронов В.Л., Полянская А.В., Молоков П.Б. Анализ углеродных материалов, используемых в качестве анодов в производстве фтора // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330. – № 4. – С. 78–88. DOI: <https://doi.org/10.18799/24131830/2019/4/202>.
9. Софронов В.Л., Буйновский А.С., Дамм Ю.П. Исследование свойств коксовых пластин марок «ВХК» и «Донкарб» // Химия в интересах устойчивого развития. – 2019. – Т. 27. – № 4. – С. 392–405. DOI: 10.15372/KhUR2019151.
10. Способ изготовления коксовых пластин: пат. № 2108967, Российская Федерация, С1; заявл. 22.11.1995; опубл. 20.04.1998. – 5 с.
11. Черкина П.П., Кириченко Т.В. Анализ конкурентной среды рынка нефтяного игольчатого кокса в России и за рубежом // Сборник научных трудов III Межвузовской научно-практической конференции ученых, специалистов и студентов, посвященной празднованию Дня рождения факультета комплексной безопасности ТЭК в Российском государственном университете нефти и газа имени И.М. Губкина. – М.: Перспектива, 2022. – С. 239–248. URL: <https://elibrary.ru/uclbwl> (дата обращения 15.01.2025).
12. Газофазное уплотнение углерод-углеродных композиционных материалов в установках с радиально движущейся зоной пиролиза / А.Ф. Ильющенко, М.А. Андреев, О.А. Прохоров, А.Н. Суворов // Порошковая металлургия. Республиканский межведомственный сборник научных трудов. – 2021. – Т. 44. – С. 155–164. URL: <https://elibrary.ru/htidpi> (дата обращения 15.01.2025).
13. Goodhew P.J., Humphreys J., Beanland R. Electron microscopy and analysis. 3rd ed. – New York: CRC Press, 2000. – 254 p.
14. Sadler B.A. Critical issues in anode production and quality to avoid anode performance problems // Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies. – 2015. – Vol. 5. – № 8. – P. 546–568.

15. Nakajima T. Fluorine-carbon and fluoride-carbon materials: chemistry, physics, and applications // Library of Congress cataloging-in-publication data / Ed. by T. Nakajima. – New York: CRC Press, 2001. – 416 p.
16. Watanabe N., Ishii Y., Yoshizawa S. Studies on the preparation of fluorine and its compounds. III Relation between the wettability of anode and the anodic polarization in the electrolytic generation of fluorine // Journal of the Electrochemical Society of Japan. – 1961. – Vol. 29. – № 3. – P. 180–186. DOI: <https://doi.org/10.5796/jesj.29.3.E180>.
17. Neumark H. Electrolytic fluorine production in Germany // Journal of the Electrochemical Society – 1947. – Vol. 91. – P. 367–385. DOI: [10.1149/1.3071789](https://doi.org/10.1149/1.3071789)
18. Role of the surface properties of carbon anodes in the electrolytic preparation of fluorine / F. Lantelme, H. Groult, C. Belhomme, B. Morel, F. Nicolas // Journal of New Materials for Electrochemical Systems. – 2006. – Vol. 9. – № 3. – P. 283–290.
19. Roesky H.W. Efficient preparation of fluorine compounds // A comprehensive guide to creating fluorine-based compounds and materials of the future / Ed. by H.W. Roesky. – Hoboken, New Jersey: Wiley, 2012. – 460 p. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781118409466>.
20. Зусайлов Ю.Н. Контроль качества продукции в производствах угольных анодов, фтора и гексафторида урана. – Ангарск: Ангарский государственный технический университет, 2017. – 267 с.

Информация об авторах

Владимир Леонидович Софронов, доктор технических наук, профессор кафедры химии и технологии материалов современной энергетики Северского технологического института – филиала Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», Россия, 636036, г. Северск, пр. Коммунистический, 65; vlsofronov@mephi.ru. <https://orcid.org/0009-0004-9513-8412>

Семён Александрович Ткачук, преподаватель кафедры машин и аппаратов химических и атомных производств Северского технологического института – филиала Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», Россия, 636036, г. Северск, пр. Коммунистический, 65; semenaleksandrovih@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0002-8642-7413>

Александр Николаевич Жиганов, доктор технических наук, профессор кафедры химии и технологии материалов современной энергетики Северского технологического института – филиала Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», Россия, 636036, г. Северск, пр. Коммунистический, 65; ANZhiganov@mephi.ru. <https://orcid.org/0009-0003-5998-7727>

Сергей Александрович Житков, кандидат технических наук, доцент кафедры химии и технологии материалов современной энергетики Северского технологического института – филиала Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», Россия, 636036, г. Северск, пр. Коммунистический, 65; zhisa47@mail.ru. <https://orcid.org/0009-0004-9158-1011>

Поступила в редакцию: 24.03.2025

Поступила после рецензирования: 30.04.2025

Принята к публикации: 16.06.2025

REFERENCES

1. Kornilov V.V. Retrospective analysis and forecast of development of some branches of fluorochemical industry. *Online journal «Fluorine notes»*, 2024, vol. 157, no. 6, pp. 1–21. Available at: http://ru.notes.fluorine1.ru/public/2024/6_2024/article_2.html (accessed 15 January 2025).
2. Belyaev V.M. Mechanism and kinetics of electrode processes in electrolysis of KF·nHF melt. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2003, vol. 306, no. 6, pp. 85–90. (In Russ.) Available at: <https://elibrary.ru/hpoptj> (accessed 15 January 2025).
3. Leech H.R. Laboratory and technical production of fluorine and its compounds. *Quarterly Reviews, Chemical Society*, 1949, vol. 22, no. 3, pp. 22–35. DOI: [10.1039/QR9490300022](https://doi.org/10.1039/QR9490300022).
4. Sofronov V.L., Zhitkov S.A., Makaseev Yu.N., Tkachuk S.A. Study of the volt-ampere characteristics of the process of obtaining fluorine by medium-temperature electrolysis. *Bulletin of Tomsk State University. Chemistry*, 2024, no. 36, pp. 81–89. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.17223/24135542/36/6>.
5. Tverdokhlebova V.P., Khramenko S.A., Buryushkina F.A., Pavlova I.V. Petroleum coke for the aluminum industry. Technology and properties. *Journal of the Siberian Federal University. Chemistry*, 2010, vol. 3, no. 4, pp. 369–386. (In Russ.) Available at: <https://elibrary.ru/neusxv>
6. Zolotova A.G., Petrova V.F., Kartashova I.V., Vdovenko D.M. Influence of petroleum coke properties on the performance characteristics of baked anodes for aluminum production. *Bulletin of the Volgograd State Technical Institute*, 2023, vol. 281, no. 10, pp. 33–39. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.35211/1990-5297-2023-10-281-33-39>.
7. Sofronov V.L., Zheronkina O.G., Kholina K.V. Raw material base and prospects for fluorine production in Russia. *Bulletin of higher educational institutions. Physics*, 2013, vol. 56, no. 4/2, pp. 114–123. (In Russ.) Available at: <https://elibrary.ru/qzxiiph> (accessed 15 January 2025).
8. Sofronov V.L., Polyanskaya A.V., Molokov P.B. Analysis of carbon materials used as anodes in fluorine production. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 4, pp. 78–88. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.18799/24131830/2019/4/202>.
9. Sofronov V.L., Buinovskiy A.S., Damm Yu.P. Study of properties of coke plates of the VKhK and Donkarb brands. *Chemistry for Sustainable Development*, 2019, vol. 27, no. 4, pp. 392–405. (In Russ.) DOI: [10.15372/KhUR2019151](https://doi.org/10.15372/KhUR2019151).
10. Zusaylov Yu.N., Koryuchkin V.N. *Method for manufacturing coke plates*. Patent RF, no. 2108967, 1998. (In Russ.)

11. Cherkina P.P., Kirichenko T.V. Analysis of the competitive environment of the petroleum needle coke market in Russia and abroad. *Collection of scientific papers of the III Interuniversity scientific and practical conference of scientists, specialists and students dedicated to the celebration of the birthday of the faculty of integrated safety of the fuel and energy complex at the Gubkin Russian State University of Oil and Gas*. Moscow, Perspektiva of Russia Publ., 2022. pp. 239–248. (In Russ.) Available at: <https://elibrary.ru/uclbwl> (accessed 15 January 2025).
12. Ilyushchenko A.F., Andreev M.A., Prokhorov O.A., Suvorov A.N. Gas-phase compaction of carbon-carbon composite materials in installations with a radially moving pyrolysis zone. *Powder metallurgy. Republican interdepartmental collection of scientific papers*. Minsk, 2021. pp. 155–164. (In Russ.) Available at: <https://elibrary.ru/htidpi> (accessed 15 January 2025).
13. Goodhew P.J., Humphreys J., Beanland R. *Electron microscopy and analysis*. 3rd ed. New York, CRC Press, 2000. 254 p.
14. Sadler B.A. Critical issues in anode production and quality to avoid anode performance problems. *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*, 2015, vol. 5, no. 8, pp. 546–568. (In Russ.)
15. Nakajima T. Fluorine-carbon and fluoride-carbon materials: chemistry, physics, and applications. *Library of Congress cataloging-in-publication data*. Eds. T. Nakajima. New York, CRC Press, 2001. 416 p.
16. Watanabe N., Ishii Y., Yoshizawa S. Studies on the preparation of fluorine and its compounds. III Relation between the wettability of anode and the anodic polarization in the electrolytic generation of fluorine. *Journal of the Electrochemical Society of Japan*, 1961, vol. 29, no. 3, pp. 180–186. DOI: <https://doi.org/10.5796/jesj.29.3.E180>.
17. Neumark H. Electrolytic fluorine production in Germany. *Journal of the Electrochemical Society*, 1947, vol. 91, pp. 367–385. DOI: [10.1149/1.3071789](https://doi.org/10.1149/1.3071789).
18. Lantelme F., Groult H., Belhomme C., Morel B., Nicolas F. Role of the surface properties of carbon anodes in the electrolytic preparation of fluorine. *Journal of New Materials for Electrochemical Systems*, 2006, vol. 9, no. 3, pp. 283–290.
19. Roesky H.W. Efficient preparation of fluorine compounds. *A comprehensive guide to creating fluorine-based compounds and materials of the future*. Eds. H.W. Roesky. Hoboken, New Jersey, Wiley, 2012. 460 p. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781118409466>.
20. Zusailov Yu.N. *Quality control of products in the production of carbon anodes, fluorine and uranium hexafluoride*. Angarsk, Angarsk State Technical University Publ., 2017. 267 p. (In Russ.)

Information about the authors

Vladimir L. Sofronov, Dr. Sc., Professor, Seversk Technological Institute – branch of the National Research Nuclear University «MEPhI», 65, Kommunistichesky avenue, Seversk, 636036, Russian Federation; vsofronov@mephi.ru. <https://orcid.org/0009-0004-9513-8412>

Semen A. Tkachuk, Lecturer, Seversk Technological Institute – branch of the National Research Nuclear University «MEPhI», 65, Kommunistichesky avenue, Seversk, 636036, Russian Federation; semenaleksandroviht@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0002-8642-7413>

Aleksandr N. Zhiganov, Dr. Sc., Professor, Seversk Technological Institute – branch of the National Research Nuclear University «MEPhI», 65, Kommunistichesky avenue, Seversk, 636036, Russian Federation; ANZhiganov@mephi.ru. <https://orcid.org/0009-0003-5998-7727>

Sergey A. Zhitkov, Cand Sc., Associate Professor, Seversk Technological Institute – branch of the National Research Nuclear University «MEPhI», 65, Kommunistichesky avenue, Seversk, 636036, Russian Federation; zhsa47@mail.ru. <https://orcid.org/0009-0004-9158-1011>

Received: 24.03.2025

Revised: 30.04.2025

Accepted: 16.06.2025

УДК 66.011

DOI: 10.18799/24131830/2025/7/5105

Шифр специальности ВАК: 2.6.13, 2.6.10

Научная статья

Интенсификация жидкофазных процессов синтеза линейных алкилбензосульфокислот в условиях дезактивации реакционных сред

И.О. Долганова✉, И.М. Долганов, Е.Н. Ивашкина

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск

✉dolganovaio@tpu.ru

Аннотация. *Актуальность* исследования заключается в необходимости повышения эффективности производства алкилбензосульфокислот как полуфабрикатов синтетических моющих средств с хорошими моющими характеристиками и высокой биологической разлагаемостью, потребление которых растет на мировом рынке со среднегодовым темпом 3,3 %. Применение современных методов мониторинга и контроля параметров реакции в режиме реального времени позволит оптимизировать технологический процесс и обеспечить стабильность качества алкилбензосульфокислот, обуславливая оптимальную активность реакционной среды. *Цель:* совершенствование жидкофазных процессов получения алкилбензосульфокислот в промышленных реакторах в условиях дезактивации реакционных сред с использованием нестационарных математических моделей. *Объект:* установка синтеза алкилбензосульфокислот. *Методы:* метод математического моделирования многокомпонентных нестационарных химико-технологических процессов нефтепереработки и нефтехимии, квантово-химические методы расчета термодинамических функций, численные методы решения систем нелинейных дифференциальных уравнений. *Результаты.* Были разработаны математические модели реакторов реакционных процессов алкилирования бензола олефинами и сульфирования алкилбензолов, которые позволяют рассчитывать активность HF-катализатора алкилирования в зависимости от количества кислото-растворимых масел в реакторе и динамику изменения активности реакционной среды процесса сульфирования в зависимости от концентрации высоковязких тетрелинов и сульфонов. Предложена методика расчета текущей и оптимальной активности HF-катализатора на стадии алкилирования, которая позволяет точно оценить влияние концентрации кислото-растворимых масел на активность катализатора и оптимизировать технологический режим для поддержания его активности на оптимальном уровне. Получены результаты оптимизационного расчета соотношения SO₃/алкилбензолы в процессе сульфирования алкилбензолов с различным содержанием легких ароматических соединений с боковым радикалом C₁–C₄ в сырье.

Ключевые слова: алкилбензосульфокислота, алкилирование, сульфирование, реакционная среда, дезактивация

Благодарности: Исследование выполнено при поддержке гранта РНФ 25-23-00485.

Для цитирования: Долганова И.О., Долганов И.М., Ивашкина Е.Н. Интенсификация жидкофазных процессов синтеза линейных алкилбензосульфокислот в условиях дезактивации реакционных сред // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 7. – С. 133–142. DOI: 10.18799/24131830/2025/7/5105

UDC 66.011

DOI: 10.18799/24131830/2025/7/5105

Scientific paper

Intensification of liquid-phase processes for the synthesis of linear alkylbenzenesulfonic acids under conditions of the reaction media deactivation

I.O. Dolganova✉, I.M. Dolganov, E.N. Ivashkina

National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

✉dolganovaio@tpu.ru

Abstract. Relevance. The need to improve the efficiency of production of alkylbenzenesulfonic acids as semi-finished products of synthetic detergents with good detergent characteristics and high biodegradability, the consumption of which is growing in the world market at an average annual rate of 3.3%. The use of modern methods and parameters for monitoring the state in time mode allows for the optimization of the technological process and ensures the stability of the quality of alkylbenzene sulfonic acids, conditioning the optimal activity of the traditional environment. **Aim.** Improvement of liquid-phase processes for obtaining alkylbenzenesulfonic acids in industrial reactors under conditions of deactivation of reaction media using non-stationary mathematical models. **Object.** Alkylbenzenesulfonic acid synthesis unit. **Methods.** Method of mathematical modeling of multicomponent non-stationary chemical-technological processes of oil refining and petrochemistry, quantum-chemical methods for calculating thermodynamic functions, numerical methods for solving systems of nonlinear differential equations. **Results.** The authors have developed the mathematical models of reactors for the reaction processes of benzene alkylation with olefins and alkylbenzene sulfonation, which make it possible to calculate the activity of the HF alkylation catalyst depending on the amount of heavy aromatic compounds in the reactor and the dynamics of changes in the activity of the reaction medium of sulfonation depending on the concentration of high-viscosity components. The proposed method for calculating the current and optimal activity of the HF catalyst at the alkylation stage allows one to accurately assess the effect of the concentration of heavy aromatic compounds on the catalyst activity and optimize the process mode to maintain its activity at an optimal level. The results of the optimization calculation of the SO_3 /alkylbenzenes ratio in alkylbenzenes sulfonation with different contents of light aromatic compounds in the feedstock are obtained.

Keywords: alkylbenzenesulfonic acid, alkylation, sulfonation, reaction medium, deactivation

Acknowledgements: The research was supported by the Russian Science Foundation (project no. 25-23-00485).

For citation: Dolganova I.O., Dolganov I.M., Ivashkina E.N. Intensification of liquid-phase processes for the synthesis of linear alkylbenzenesulfonic acids under conditions of the reaction media deactivation. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 7, pp. 133–142. DOI: 10.18799/24131830/2025/7/5105

Введение

В настоящее время остро стоит вопрос о повышении ресурсоэффективности промышленных производств. В условиях дефицита импортных технологических решений, оборудования, отсутствия зарубежного лицензированного программного обеспечения данная проблема является особенно актуальной. Решением является разработка и внедрение отечественных цифровых инструментов, способных обеспечивать и прогнозировать эффективную работу существующих промышленных установок, а также определять оптимальные стратегии при проектировании новых.

Производство алкилбензосульфокислот (АБСК) – ключевой этап в создании современных синтетических моющих средств (СМС). Высокие моющие характеристики и биоразлагаемость АБСК определяют их востребованность, однако технологический процесс их получения сопряжен с серьезными вызовами, требующими комплексного подхода к оптимизации. Несмотря на преимущества жидкофазных реакторов – возможность эффективного теплообмена и гомогенизации – достижение максимальной эффективности производства АБСК ограничивается рядом факторов. Технология производства АБСК представляет собой многостадийный процесс, заключительными стадиями которого являются каталитическое HF-алкилирование бензола олефинами и некаталитическое сульфирование полученных алкилбензолов (АБ) [1–4].

В процессе реакций образуются дезактивирующие вещества, снижающие активность катализатора и нарушающие однородность реакционной сме-

си. Это приводит к снижению выхода целевого продукта и ухудшению качества АБСК. Кислоторастворимые масла (КРМ) образуются при алкилировании бензола алкенами в присутствии HF и представлены моноциклическими ароматическими углеводородами с непредельной боковой цепью. Неравномерное распределение компонентов в реакционной среде снижает эффективность как каталитического, так и некаталитического этапов. Сложность многостадийного процесса требует точного контроля параметров реакции на каждом этапе: температуры, давления, концентрации реагентов и времени контакта.

Применение современных методов мониторинга и контроля параметров реакции в режиме реального времени позволит оптимизировать технологический процесс и обеспечить стабильность качества АБСК, обуславливая оптимальную активность реакционной среды. Под активностью реакционной среды понимается ее способность в некаталитическом процессе обеспечивать скорость протекания реакций и селективность по целевым продуктам. В случае процесса сульфирования алкилбензолов эта способность реакционной среды снижается при образовании высоковязких компонентов (ВВК) – тетралинов и сульфонов, присутствие которых в тонкой пленке алкилбензола затрудняет диффузию молекул SO_3 в жидкую фазу.

Исследования [5–8] внесли значительный вклад в понимание роли этих компонентов в изменение активности реакционных сред жидкофазных процессов. Учеными было установлено, что дезактивация может осуществляться за счет двух основных

механизмов: образования кислоторастворимых масел, образующихся с кислотным катализатором алкилирования и образования высоковязких сульфонов в процессе сульфирования АБ. Тип дезактивирующего компонента и его концентрация обусловлены конкретными условиями процесса и составом сырья.

Экспериментальный поиск оптимальных параметров алкилирования – длительный и трудоемкий процесс. Именно поэтому все большую популярность приобретают методы математического моделирования. Они позволяют симулировать процессы в широком диапазоне параметров, предсказывать выход целевого продукта и оптимизировать технологический режим, минимизируя затраты материальных и энергетических ресурсов.

Наиболее детально с точки зрения моделирования изучены процессы алкилирования изобутана с бутиленами [9] и алкилирования бензола короткоцепочечными олефинами – этиленом [10, 11], пропиленом [12–14]. Моделирование процессов алкилирования бензола олефинами C_{10+} – одного из ключевых процессов синтеза алкилбензосульфокислот – охвачено лишь для индивидуальных компонентов (в основном C_{12}) [14–17], в то время как сырье реальной промышленной установки алкилирования является многокомпонентным, и неизбеж-

ное содержание в нем даже незначительных количеств таких побочных соединений, как диолефины, легкие ароматические соединения, может значительно снизить эффективность протекания процесса. Математические модели различной точности описания работы реакторов сульфирования АБ [18, 19] освещены в исследованиях мирового уровня, однако ни в одном из них не описаны закономерности дезактивации реакционной среды при образовании высоковязких компонентов.

Таким образом, к настоящему времени не предложено надежных способов повышения эффективности производства АБСК в условиях дезактивации реакционных сред. Цель настоящей работы заключается в интенсификации жидкофазных процессов получения алкилбензосульфокислот в промышленных реакторах в условиях дезактивации реакционных сред с использованием в качестве инструмента нестационарных математических моделей.

Объекты и методика исследования

Технологическая схема производства АБСК включает в себя блоки дегидрирования фракции парафинов C_9-C_{14} , гидрирования диолефинов, HF-алкилирования бензола олефинами с получением АБ; сульфирования АБ серным ангидридом (SO_3) с получением АБСК (рис. 1).

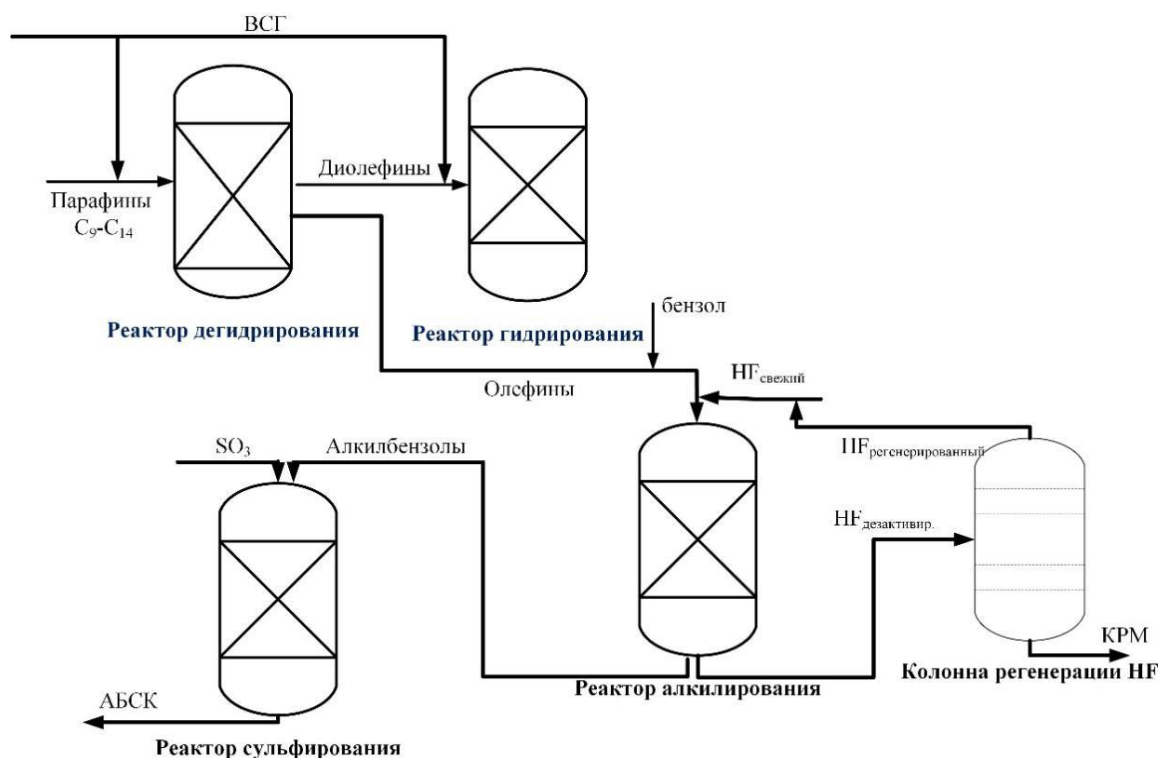


Рис. 1. Блок-схема комплекса производства АБСК: BCG – водородсодержащий газ; KPM – кислоторастворимые масла
Fig. 1. Block diagram of the alkylbenzenesulfonic acid (ABSA) production complex: BCG – hydrogen-containing gas; KPM – acid-soluble oils

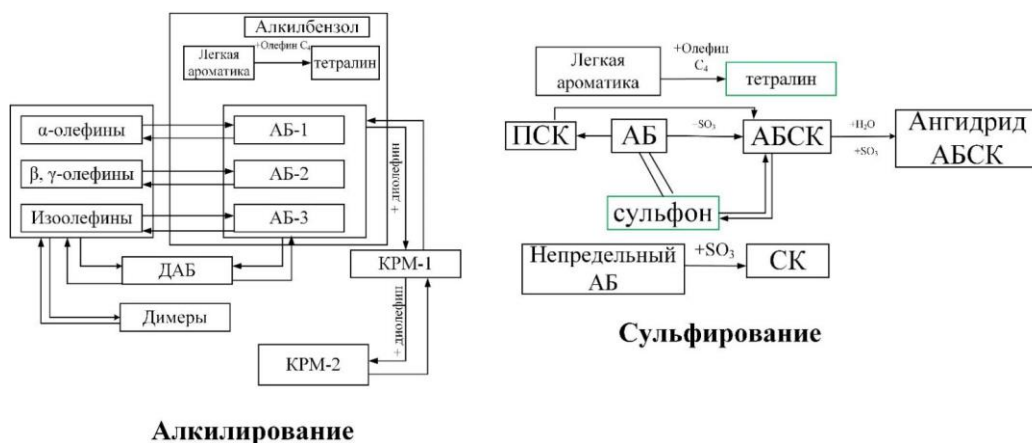


Рис. 2. Схема превращения углеводородов в технологии производства АБСК: ДАБ – диалкилбензолы; КРМ-1 и КРМ-2 – кислоторастворимые масла 1-го и 2-го типов; АБ-1..3 – 1..3-фенилалканы; ПСК – пиросульфоновая кислота, Легкая ароматика – легкие ароматические соединения с углеводородным радикалом C₁–C₄; СК – продукт сульфирования алкилбензола в боковую цепь

Fig. 2. Reaction network of hydrocarbon conversion in ABSA production technology: ДАБ – dialkylbenzenes; КРМ-1 and КРМ-2 – acid-soluble oils of types 1 and 2; АБ-1..3 – 1..3-phenylalkanes; ПСК – pyrosulfonic acid, Light aromatics – light aromatic compounds with a hydrocarbon radical C₁–C₄; СК – a product of alkylbenzene sulfonation into a side chain

Установление природы дезактивирующих компонентов

На основании оценки термодинамической вероятности превращений углеводородов составлен список реакций, протекающих в процессе HF-алкилирования бензола олефинами и сульфирования АБ SO₃ в пленочном реакторе.

При производстве АБСК образуются дезактивирующие компоненты. На стадии алкилирования такими соединениями являются КРМ, представляющие собой ароматические соединения с сопряженной двойной связью, связывающие HF в каталитически-неактивный комплекс, а на стадии сульфирования – высоковязкие тетралины и сульфоны (вязкость составляет 726,1 и 520 сСт соответственно, в то время как максимально допустимая вязкость АБСК составляет 175 сСт).

С учётом вышеописанных превращений составлена схема превращений компонентов в технологии синтеза АБСК (рис. 2).

Компонентами, снижающими активность реакционной среды на стадии алкилирования бензола олефинами, являются КРМ, а на стадии сульфирования АБ–ВБК, представленные тетралинами и сульфонами.

Образующиеся в процессе алкилирования КРМ имеют следующее строение (рис. 3):

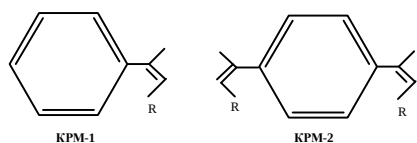


Рис. 3. Строение КРМ различных типов

Fig. 3. Structure of different types of acid soluble oil (ASO)

Математические модели процессов алкилирования бензола олефинами и сульфирования алкилбензолов

Математическое моделирование процесса алкилирования бензола олефинами

Результаты расчета термодинамических характеристик реакций, протекающих в процессе алкилирования, с использованием программного пакета Gaussian представлены в табл. 1.

Таблица 1. Результаты расчета термодинамических характеристик реакций, протекающих в процессе алкилирования бензола олефинами C₁₂ (при T – 328 K, P – 0,5 МПа)

Table 1. Results of calculation of thermodynamic characteristics of reactions occurring in benzene alkylation with C₁₂ olefins (at T – 328 K, P – 0.5 MPa)

Реакция Reaction	ΔG	ΔH
	кДж/моль kJ/mole	
Бензол+α-олефинов→2-фенилалканы Benzene+α-olefins→2-phenylalkanes	-33,7±3,6	-94,4±9,4
Бензол+β,γ,η-олефинов→ 1..3-фенилалканы Benzene+β,γ,η-olefins→ 1..3-phenylalkanes	-26,8±3,1	-71,8±7,2
Бензол+разветвленные олефины→ нелинейные АБ Benzene+branched olefins→ nonlinear AB	-10,1±1,1	-10,1±1,1
АБ+α-олефинов→ДАБ AB+α-olefins→DAB	-10,5±1,1	-76,4±7,6
Олефины→димеры Olefins→dimers	-13,25±1,3	-66,6±6,7
АБ+диолефины→КРМ-1 AB+diolefins→ASO-1	-52,1±2,1	-85,0±1,8
АБ+непредельные диолефины→КРМ-2 AB+unsaturated diolefins→ASO-2	-47,8±1,5	-82,6±2,5

После оценки гидродинамического режима в реакторе алкилирования ($Pe=59100$) принято допущение, что в реакторе поддерживается гидродинамический режим идеального вытеснения, была записана математическая модель в следующем виде:

$$\begin{cases} \frac{dC_i}{d\tau} = \sum_{j=1}^N W_{ij}; \\ \rho^{cm} C_p^{cm} \frac{dT}{d\tau} = \sum_{j=1}^N (-\Delta H_j) W_j. \end{cases}$$

Начальные условия: при $t=t_0$ $C=C_0$; $T=T_0$, где C_i – концентрация i -го компонента, моль/м³; W_{ij} – скорость изменения концентрации i -го компонента в j -й реакции, моль/(м³·с); τ – время контакта, с; C_p^{cm} – массовая теплоемкость реакционной смеси, Дж/(кг·К); ρ^{cm} – плотность реакционной смеси, кг/м³; T – температура, К; $(-\Delta H_j)$ – теплота j -й химической реакции, Дж/моль; N – количество реакций, протекающих в химическом реакторе.

Мерой активности HF-катализатора является отношение текущего свободного количества HF, не связанной с КРМ, к начальному количеству чистого катализатора.

Для описания дезактивации катализаторов применяют линейные, степенные (чаще квадратичные), экспоненциальные и логарифмические зависимости. Наш многолетний опыт по моделированию различных сложных систем позволяет сделать заключение, что для математического описания дезактивации промышленных катализаторов многокомпонентных промышленных процессов, осложненных образованием дезактивирующих компонентов (скорость образования которых изменяется по ходу сырьевого цикла), наилучшие показатели сходимости расчетных и экспериментальных значений наблюдаются при использовании следующего выражения:

$$a = a_0 e^{-\alpha C_{TAP}},$$

где a и a_0 – текущее и начальное значения активности HF, отн. ед.; α – фактор дезактивации; C_{TAP} – мольная доля ТАР в реакторе, дол. ед. При $C_{TAP}=0$ $\alpha=1$; при $C_{TAP}=1$ $\alpha=0$.

В данном случае активность HF-катализатора рассчитывалась дифференциально, с использованием C_{TAP} , рассчитанных на малых интервалах времени контакта. Тогда

$$W_j = W'_j \cdot a,$$

где W'_j – скорость химической реакции без учета дезактивации.

Математическое моделирование процесса сульфирования алкилбензолов

Результаты расчета термодинамических характеристик реакций, протекающих в процессе суль-

фирования алкилбензолов, с использованием программного пакета Gaussian представлены в табл. 2.

Таблица 2. Термодинамические характеристики реакций процесса сульфирования АБ (при $T = 308$ К, $P = 0,04$ МПа, для радикала C_{12})

Table 2. Results of calculation of thermodynamic characteristics of reactions occurring alkylbenzenes sulfonation (at $T = 308$ K, $P = 0.04$ MPa)

Реакция Reaction	ΔG	ΔH
	кДж/моль/[kJ/mole]	
АБ+SO ₃ →АБСК AB+SO ₃ →ABSA	-236±5,7	-212,5±4,1
АБСК+АБ↔сульфон+H ₂ O ABSA+AB↔sulfone+H ₂ O	-1,2±0,1	-230,2±2,6
ПСК+АБСК→ангидридАБСК+H ₂ SO ₄ PSA+ABSA→ABSA anhydride+H ₂ SO ₄	-48,1±1,2	-164,1±1,2
АБ+2SO ₃ →ПСК AB+2SO ₃ →pyrosulfonic acid (PSA)	-93,6±2,0	-184,2±3,0
ПСК+АБ→2 АБСК PSA+AB→2 ABSA	-37,1±2,0	-143,2±2,5
ангидрид АБСК+H ₂ O→2АБСК ABSA anhydride+H ₂ O→2ABSA	-189,6±2,1	-155,7±2,5
АБ+SO ₃ →эфир+ H ₂ O AB+SO ₃ →ether+ H ₂ O	-34,1±1,3	-163,1±1,3
эфир+H ₂ O→спирт ester+H ₂ O→alcohol	-93,4±2,2	-190,0±3,5
непредельный АБ+SO ₃ →СК unsaturated AB+SO ₃ →SK	-216±4,6	-199,1±1,3
непредельный АБ+SO ₃ →сультон unsaturated AB+SO ₃ →sultone	-262,1±9,05	-170,0±1.1
Легкая ароматика→толуол+олефин C ₄ 4 олефин C ₄ →гомологи тетралина Light aromatics→toluene + C ₄ olefin 4 olefin C ₄ →tetralin homologues	-58,7±1,3	-66,1±2.1
		Для брутто-реакции For brutto-reaction

Такие компоненты, как ангидриды АБСК, эфиры, спирты, сультоны, в схеме превращений целесообразно объединить в псевдокомпонент «несульфированный остаток» в виду их малого содержания в продуктовой смеси. Сульфон и гомологи тетралина объединены в псевдокомпонент «ВВК».

Математическая модель процесса сульфирования АБ в стационарном виде примет следующий вид:

$$\begin{cases} \frac{dC_i^k}{d\tau} = -\frac{\beta F \Delta C_i}{V_k} + \sum_{j=1}^N W_{ij}; \\ \frac{dC_{SO_3}^r}{d\tau} = -\frac{\beta F \Delta C_{SO_3}}{V_r}; \\ \rho^{cm} C_p^{cm} \frac{dT}{d\tau} = -\frac{K_T F_T \Delta T}{V_k} + \sum_{j=1}^N (-\Delta H_j) W_j, \end{cases}$$

Граничные условия: при $\tau=0$ $C_i^k=C_{i0}^k$; $C_{SO_3}^r=C_{SO_3(0)}^r$; $T=T_0$, где C_i^k – концентрация i -го компонента в жидкой фазе, моль/м³; $C_{SO_3}^r$ – концентрация SO₃ в газовой фазе, моль/м³; ΔC_i – разность

концентраций компонентов, моль/м³; β – коэффициент массоотдачи, м/с; T – температура, К; F – поверхность раздела фаз, м²; F_T – поверхность теплообмена, м²; K_T – коэффициент теплопередачи, Вт/(м²·К); ΔT – средняя разность температур между теплоносителями (реакционной смесью и охлаждающей водой), К; V_r и $V_{ж}$ – объемы газовой и жидкой фазы в реакционном пространстве, м³.

Таблица 3. Адекватность математических моделей процессов алкилирования бензола олефинами и сульфирования алкилбензолов по ключевым параметрам

Table 3. Adequacy of mathematical models of benzene alkylation with olefins and sulfonation of alkylbenzenes by key parameters

Алкилирование/Alkylation					
Выработка алкилбензолов Alkylbenzenes yield			Бромный индекс алкилбензола Alkylbenzenes bromine index		
Расчет Calculated	Эксперимент Experimental	Δ, %	Расчет Calculated	Эксперимент Experimental	Δ, %
кг/час/kg/hour			мг/100 г/mg/100 g		
6953,7	7064,6	1,6	3,5	3,5	0,0
6833,1	7125,2	4,1	3,3	3,2	3,1
6906,2	7122,7	3,0	3,3	3,2	3,1
6953,6	7064,6	1,6	3,5	3,5	0,0
6893,1	6763,6	1,9	3,3	3,2	3,1
6954,1	7064,6	1,6	3,3	3,2	3,1
6954,1	7064,6	1,6	3,5	3,5	0,0
Сульфирование/Sulfonation					
Доля алкилбензосульфокислоты в продуктовом потоке Alkylbenzenesulfonic acid in the product flow					
Расчет/Calculated		Эксперимент/Experimental		Δ, %	
мас. %/wt %					
96,8		96,4		0,4	
96,9		96,4		0,5	
96,5		96,8		0,3	
96,9		97,0		0,1	
96,9		96,9		0,0	
96,8		96,3		0,5	
97,0		96,3		0,7	

Разработанные математические модели процессов алкилирования и сульфирования проверены на адекватность путем сравнения экспериментальных и рассчитанных значений основных показателей работы реакторов (табл. 3).

Разработанные математические модели описывают процессы алкилирования бензола олефинами и сульфирования АБ с высокой степенью достоверности.

Повышение эффективности производства алкилбензосульфокислоты с использованием компьютерной моделирующей системы

Была разработана методика расчета оптимальной подачи HF в регенератор [18]:

$$V_{HF_{\text{рег}}} = \frac{G_{\text{КРМ}_{\text{реактор}}}}{0,0058\rho_{HF}},$$

где $V_{HF_{\text{рег}}}$ – объемный расход дезактивированного HF в регенератор, м³/ч; $G_{\text{КРМ}_{\text{реактор}}}$ – количество ТАР, образующихся в реакторе алкилирования бензола олефинами в час, кг/ч; ρ_{HF} – плотность HF, кг/м³.

Из вышеописанного следует, что оптимальный расход HF на регенерацию зависит от количества диолефинов, образующихся в процессе дегидрирования парафинов [15–17, 20]. На рис. 4 представлены полученные значения оптимальных расходов HF в регенератор.

Процесс алкилирования бензола олефинами, катализируемый HF, чувствителен к накоплению КРМ в реакционной среде. Эти соединения, являясь побочными продуктами реакции, постепенно дезактивируют катализатор, снижая эффективность процесса и выход целевого продукта – алкилбензола. Разработанные математические модели позволяют предсказывать активность HF-катализатора в зависимости от концентрации ТАР. Это позволяет оптимизировать режим работы реактора, в частности регулировать подачу свежего катализатора и организовывать эффективный регенератор HF. Оптимальная подача HF в регенератор является критическим параметром, напрямую влияющим на увеличение выработки алкилбензола. Более точный контроль позволяет минимизировать потери катализатора и повысить производительность процесса [21, 22].

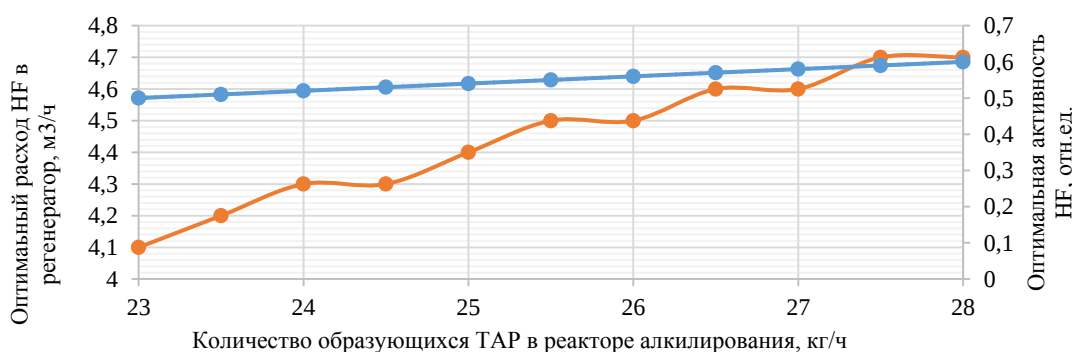


Рис. 4. Оптимальные значения расхода HF в колонну-регенератор (расчет по модели)

Fig. 4. Optimal values of HF flow rate into the regenerator column (calculation according to the model)

Разработанная математическая модель процесса сульфирования АБ позволяет прогнозировать и оптимизировать мольное соотношение $\text{SO}_3/\text{АБ}$ в течение всего межпромывочного цикла. При низком значении мольного соотношения $\text{SO}_3/\text{АБ}$ наблюдается рост доли АБСК в продуктах, при превышении оптимального значения данного соотношения увеличивается кислотность реакционной среды, в связи с чем интенсифицируются реакции образования высоковязких сульфонов, что приводит к росту вязкости и снижению эффективности процесса (рис. 5). При этом оптимальное соотношение $\text{SO}_3/\text{алкилбензолы}$ различно для сырья с разным содержанием легких ароматических соединений с боковым радикалом $\text{C}_1\text{--C}_4$ в сырье.

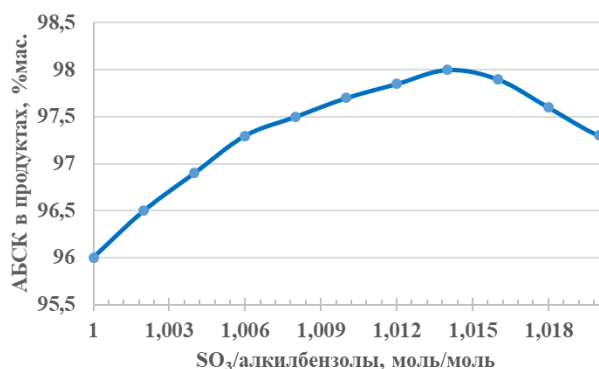


Рис. 5. Зависимость концентрации АБСК в продуктах от мольного соотношения $\text{SO}_3/\text{АБ}$

Fig. 5. Dependence of ABSA concentration in products on the molar ratio of SO_3/AB

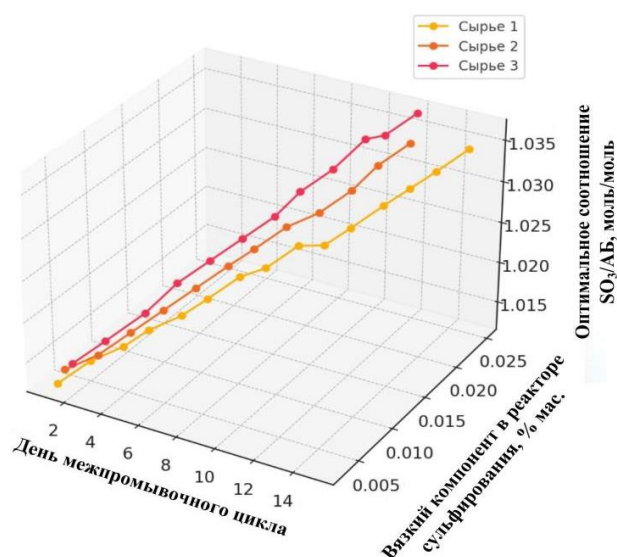


Рис. 6. Результаты прогнозного оптимизационного расчета для различных составов сырья реактора сульфирования (расчет по модели)

Fig. 6. Results of the predictive optimization calculation for various compositions of the sulfonation reactor feedstock (model calculations)

Результаты проведенного оптимизационного прогнозного расчета, представленные ниже, демонстрируют возможности совершенствования процесса сульфирования при различных условиях. Расчет проводился с учетом вариаций в качестве сырья, а именно, с различным содержанием легких ароматических соединений с боковым радикалом $\text{C}_1\text{--C}_4$ в сырье. В качестве примера (рис. 6) были проведены расчеты для трех типов сырья (сырье 1, 2 и 3), содержащих 4, 5 и 6 мас. % легких ароматических соединений соответственно, с целью поддержания заданной доли АБСК на уровне 96,6 мас. %.

При этом оптимальное соотношение $\text{SO}_3/\text{АБ}$ для поддержания доли АБСК на постоянном уровне 96,6 мас. % ежедневно увеличивается, для сырья 1 – с 1,012 до 1,037 моль/моль, для сырья 2 – с 1,013 до 1,037 моль/моль, для сырья 3 – с 1,013 до 1,035 моль/моль.

Заключение

Эта работа посвящена улучшению промышленного производства алкилбензосульфокислот. Процесс осложняется дезактивацией реакционной среды. Для решения этой задачи разработана нестационарная математическая модель, которая позволяет оптимизировать процесс производства алкилбензосульфокислот в условиях постепенного снижения активности катализатора.

Математическое моделирование позволяет описать динамику изменения активности реакционной среды в зависимости от концентрации ВВК, минимизировать их образование и оптимизировать параметры процесса.

Предложенная методика расчета текущей и оптимальной активности HF-катализатора на стадии алкилирования позволяет точно оценить влияние концентрации кислото-растворимых масел на активность катализатора и оптимизировать технологический режим для поддержания его активности на оптимальном уровне. Регулярный мониторинг и расчет активности катализатора позволяют избежать значительного снижения выхода целевого продукта и предотвратить преждевременную замену катализатора.

Интенсификация процесса сульфирования алкилбензолов заключается в обеспечении оптимального мольного соотношения $\text{SO}_3/\text{АБ}$, обуславливающего минимизацию скоростей образования ВВК, увеличение длительности межпромывочного цикла работы реактора сульфирования и предотвращение потерь в выработке АБСК. Наличие экстремальной зависимости доли АБСК в продуктовом потоке от мольного соотношения $\text{SO}_3/\text{АБ}$ и проведенный анализ своевременности промывки реактора сульфирования определяет возможность проведения оптимизации работы установки в течение межпромывочного цикла с учетом содержания легких ароматических соединений с боковым радикалом $\text{C}_1\text{--C}_4$ в сырье.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Chruściel A., Hreczuch W. Kinetic modelling and improvement of the ageing step of industrial alkylbenzene sulfonation process // *Chemical Engineering and Processing*. – 2022. – Vol. 181. – P. 109143. DOI: 10.1016/j.cep.2022.109143.
2. Tan F., Li X., Dong J. Synthesis of alkylbenzenes via the alkylation of benzene using α -olefin dimers and the surfactant properties of their sulfonates // *Tenside Surfactants Detergents*. – 2022. – Vol. 59. – P. 39–50. DOI: 10.1515/tsd-2021-2371.
3. Yusuff A., Ishola N., Gbadamosi A. Artificial intelligence techniques and response surface methodology for the optimization of methyl ester sulfonate synthesis from used cooking oil by sulfonation // *ACS Omega*. – 2023. – Vol. 8. – P. 19287–19301. DOI: 10.1021/acsomega.2c08117.
4. Зыкова А.А. Повышение эффективности процесса сульфирования алкилбензолов серным ангидридом в многотрубном пленочном реакторе с использованием нестационарной математической модели: дис. ... канд. техн. наук. – Томск, 2023. – 121 с.
5. Modeling of side reactions of isobutane alkylation with butenes catalyzed by trifluoromethane sulfonic acid / A.S. Berenblyum, E.A. Katsman, R.A. Berenblyum, S.I. Hommeltoft // *Applied Catalysis A: General*. – 2005. – Vol. 284. – P. 207–214. DOI: 10.1016/j.apcata.2005.01.036.
6. Acid soluble oil, by-product formed in isobutane alkylation with alkene in the presence of trifluoro methane sulfonic acid: Part I Acid soluble oil composition and its poisoning effect / A.S. Berenblyum, L.V. Ovsyannikova, E.A. Katsman, J. Zavilla, S.I. Hommeltoft, Y.Z. Karasev // *Applied Catalysis A: General*. – 2002. – Vol. 232. – P. 51–58. DOI: 10.1016/S0926-860X(02)00065-0.
7. Roberts D.W. Optimization of the linear alkyl benzene sulfonation process for surfactant manufacture // *Organic Process Research & Development*. – 2003. – Vol. 7. – P. 172–184. DOI: 10.1021/op020088w.
8. Roberts D.W. Sulfonation technology for anionic surfactant manufacture // *Organic Process Research & Development*. – 1998. – Vol. 2. – P. 194–202. DOI: 10.1021/op9700439.
9. Ramaswamy R.C., Ramachandran P.A., Dudukovic M.P. Modeling of solid acid catalyzed alkylation reactors // *International Journal of Chemical Reactor Engineering*. – 2005. – Vol. 3. – № A42. DOI: 10.2202/1542-6580.1255.
10. Modelling and simulation of benzene alkylation process reactors for production of ethylbenzene / H. Ganji, J.S. Ahari, A. Farshi, M. Kakavand // *Petroleum & Coal*. – 2004. – Vol. 46. – P. 55–63.
11. Analysis of diffusion limitation in the alkylation of benzene over H-ZSM-5 by combining quantum chemical calculations, molecular simulations, and a continuum approach / N. Hansen, R. Krishna, J.M. VanBaten, A.T. Bell, F.J. Keil // *Journal of Physical Chemistry*. – 2009. – Vol. 113. – P. 235–246. DOI: 10.1021/jp8073046.
12. Kolesnikov I.M. Kinetics of alkylation of benzene with propylene in the presence of demethyldichlorosilane // *Chemistry and technology of fuels and oils*. – 2004. – Vol. 40. – P. 403–411. DOI: 10.1007/s10553-005-0009-4.
13. Han M., Li X., Lin S. Intrinsic kinetics of the alkylation of benzene with propylene over β zeolite catalyst // *Kinetics & Catalysis*. – 2001. – Vol. 42. – P. 533–538. DOI: 10.1023/A:1010581708069.
14. Iliuta I., Bozga G., Lupascu M. Liquid-phase alkylation of benzene with propylene catalysed by HY zeolites // *Chemical Engineering Technology*. – 2001. – Vol. 24. – P. 933–944. DOI: 10.1002/1521-4125(200109)24:9<933::aid-ceat933>3.0.co;2-9
15. Characterization and kinetic investigation of tungstophosphoric supported on SiO₂ for alkylation of benzene with 1-dodecene to synthesize linear alkylbenzene / J. Zhang, Z. Zhu, C. Li, L. Wen, E. Min // *Journal of Molecular Catalysis A Chemical*. – 2003. – Vol. 198. – P. 359–367. DOI: 10.1016/S1381-1169(03)00004-9.
16. Characterization and kinetic investigation of tungstophosphoric supported on SiO₂ for alkylation of benzene with 1-dodecene to synthesize linear alkylbenzene / J. Zhang, Z. Zhu, C. Li, L. Wen, E. Min // *Journal of Molecular Catalysis A Chemical*. – 2003. – Vol. 226. – P. 301–307. DOI: 10.1016/S1381-1169(03)00004-9.
17. Relationships between acidity and catalytic performance of solid acid in synthesis of linear alkyl benzene (LAB) / J. Ren, Y.S. Lou, H.K. Yuan, L. Shen // *Advanced Materials Research*. – 2011. – Vol. 233. – P. 1447–1450. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.233-235.1447.
18. Dabir B., Riazi M.R., Davoudirad H.R. Modelling of falling film reactors // *Chemical Engineering Science*. – 1996. – Vol. 51. – P. 2553–2558. DOI: 10.1016/0009-2509(96)00113-3.
19. Gutiérrez-González J., Mans-Teixidó C., Costa-López J. Improved mathematical model for a falling film sulfonation reactor // *Industrial and Engineering Chemistry Research*. – 1988. – Vol. 27. – P. 1701–1707. DOI: 10.1021/ie00081a023.
20. Анализ направлений оптимизации работы системы «реактор-регенератор» в технологии производства линейных алкилбензолов / И.О. Долганова, И.М. Долганов, Е.Н. Ивашкина, Э.Д. Иванчина, Е.В. Францина // *Известия Томского Политехнического Университета*. – 2013. – Т. 322. – № 3. – С. 73–77.
21. Effect of thermodynamic stability of higher aromatic hydrocarbons on the activity of the HF catalyst for benzene alkylation with C₉–C₁₄ olefins / E.D. Ivanchina, E.N. Ivashkina, I.O. Dolganova, V. V. Platonov // *Petroleum Chemistry*. – 2004. – Vol. 54. – P. 445–451. DOI: 10.1134/S096554411406005X.
22. Influence of aromatics content in the feed stream on HF-catalyst regenerator and linear alkylbenzenes sulphonation reactor stability / I. Dolganova, E. Ivashkina, E. Ivanchina, I. Dolganov // *Journal of Chemical Technology & Metallurgy*. – 2018. – Vol. 53. – P. 390–394.

Информация об авторах

Ирэна Олеговна Долганова, доктор технических наук, младший научный сотрудник отделения химической инженерии Инженерной школы природных ресурсов, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30; dolganovaio@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8536-0501>

Игорь Михайлович Долганов, кандидат технических наук, доцент отделения химической инженерии Инженерной школы природных ресурсов, Национальный исследовательский Томский политехнический

университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30; dolganovim@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-9848-4933>

Елена Николаевна Ивашкина, доктор технических наук, профессор отделения химической инженерии Инженерной школы природных ресурсов, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30; ivashkinaen@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3984-1352>

Поступила в редакцию: 15.05.2025

Поступила после рецензирования: 03.06.2025

Принята к публикации: 18.06.2025

REFERENCES

1. Chruściel A., Hreczuch W. Kinetic modelling and improvement of the ageing step of industrial alkylbenzene sulfonation process. *Chemical Engineering and Processing*, 2022, vol. 181, pp. 109143. DOI: 10.1016/j.cep.2022.109143.
2. Tan F., Li X., Dong J. Synthesis of alkylbenzenes via the alkylation of benzene using α -olefin dimers and the surfactant properties of their sulfonates. *Tenside Surfactants Detergents*, 2022, vol. 59, pp. 39–50. DOI: 10.1515/tsd-2021-2371.
3. Yusuff A., Ishola N., Gbadamosi A. Artificial intelligence techniques and response surface methodology for the optimization of methyl ester sulfonate synthesis from used cooking oil by sulfonation. *ACS Omega*, 2023, vol. 8, pp. 19287–19301. DOI: 10.1021/acsomega.2c08117.
4. Zykhova A.A. *Improving the efficiency of the alkylbenzene sulfonation process with sulfuric anhydride in a multi-tube film reactor using a non-stationary mathematical model: dis. candidate of technical sciences*. Cand. Dis. Tomsk, 2023. 121 p. (In Russ.)
5. Berenblyum A.S., Katsman E.A., Berenblyum R.A., Hommeltoft S.I. Modeling of side reactions of isobutane alkylation with butenes catalyzed by trifluoromethane sulfonic acid. *Applied Catalysis A: General*, 2005, vol. 284, pp. 207–214. DOI: 10.1016/j.apcata.2005.01.036.
6. Berenblyum A.S., Ovsyannikova L. V., Katsman E.A., Zavilla J., Hommeltoft S.I., Karasev Y.Z. Acid soluble oil, by-product formed in isobutane alkylation with alkene in the presence of trifluoro methane sulfonic acid: Part I Acid soluble oil composition and its poisoning effect. *Applied Catalysis A: General*, 2002, vol. 232, pp. 51–58. DOI: 10.1016/S0926-860X(02)00065-0.
7. Roberts D.W. Optimization of the linear alkyl benzene sulfonation process for surfactant manufacture. *Organic Process Research & Development*, 2003, vol. 7, pp. 172–184. DOI: 10.1021/op020088w.
8. Roberts D.W. Sulfonation technology for anionic surfactant manufacture. *Organic Process Research & Development*, 1998, vol. 2, pp. 194–202. DOI: 10.1021/op9700439.
9. Ramaswamy R.C., Ramachandran P.A., Dudukovic M.P. Modeling of solid acid catalyzed alkylation reactors. *International Journal of Chemical Reactor Engineering*, 2005, vol. 3, no. A42. DOI: 10.2202/1542-6580.1255.
10. Ganji H., Ahari J.S., Farshi A., Kakavand M. Modelling and simulation of benzene alkylation process reactors for production of ethylbenzene. *Petroleum & Coal*, 2004, vol. 46, pp 55–63.
11. Hansen N., Krishna R., VanBaten J.M., Bell A.T., Keil F.J. Analysis of diffusion limitation in the alkylation of benzene over H-ZSM-5 by combining quantum chemical calculations, molecular simulations, and a continuum approach. *Journal of Physical Chemistry*, 2009, vol. 113, pp. 235–246. DOI: 10.1021/jp8073046.
12. Kolesnikov I.M. Kinetics of alkylation of benzene with propylene in the presence of demethyldichlorosilane. *Chemistry and technology of fuels and oils*, 2004, vol. 40, pp. 403–411. DOI: 10.1007/s10553-005-0009-4.
13. Han M., Li X., Lin S. Intrinsic kinetics of the alkylation of benzene with propylene over β zeolite catalyst. *Kinetics & Catalysis*, 2001, vol. 42, pp. 533–538. DOI: 10.1023/A:1010581708069.
14. Iliuta I., Bozga G., Lupascu M. Liquid-phase alkylation of benzene with propylene catalysed by HY zeolites. *Chemical Engineering Technology*, 2001, vol. 24, pp. 933–944. DOI: 10.1002/1521-4125(200109)24:9<933::aid-ceat933>3.0.co;2-9
15. Zhang J., Zhu Z., Li C., Wen L., Min E. Characterization and kinetic investigation of tungstophosphoric supported on SiO₂ for alkylation of benzene with 1-dodecene to synthesize linear alkylbenzene. *Journal of Molecular Catalysis A Chemical*, 2003, vol. 198, pp. 359–367. DOI: 10.1016/S1381-1169(03)00004-9.
16. Zhang J., Zhu Z., Li C., Wen L., Min E. Characterization and kinetic investigation of tungstophosphoric supported on SiO₂ for alkylation of benzene with 1-dodecene to synthesize linear alkylbenzene. *Journal of Molecular Catalysis A Chemical*, 2003, vol. 226, pp. 301–307. DOI: 10.1016/S1381-1169(03)00004-9.
17. Ren J., Lou Y.S., Yuan H.K., Shen L. Relationships between acidity and catalytic performance of solid acid in synthesis of linear alkyl benzene (LAB). *Advanced Materials Research*, 2011, vol. 233, pp. 1447–1450. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.233-235.1447.
18. Dabir B., Riazi M.R., Davoudirad H.R. Modelling of falling film reactors. *Chemical Engineering Science*, 1996, vol. 51, Iss. 11, pp. 2553–2558. DOI: 10.1016/0009-2509(96)00113-3.
19. Gutiérrez-González J., Mans-Teixidó C., Costa-López J. Improved mathematical model for a falling film sulfonation reactor. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 1988, vol. 27, pp. 1701–1707. DOI: 10.1021/ie00081a023.
20. Dolganova I.O., Dolganov I.M., Ivashkina E.N., Ivanchina E.D., Francina E.V. Analysis of directions of optimization of the reactor-regenerator system operation in the technology of production of linear alkylbenzenes. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2013, vol. 322, no. 3, pp. 73–77. (In Russ.)
21. Ivanchina E.D., Ivashkina E.N., Dolganova I.O., Platonov V. V. Effect of thermodynamic stability of higher aromatic hydrocarbons on the activity of the HF catalyst for benzene alkylation with C₉-C₁₄ olefins. *Petroleum Chemistry*, 2004, vol. 54, pp. 445–451. DOI: 10.1134/S096554411406005X.

22. Dolganova I., Ivashkina E., Ivanchina E., Dolganov I. Influence of aromatics content in the feed stream on HF-catalyst regenerator and linear alkylbenzenes sulphonation reactor stability. *Journal of Chemical Technology & Metallurgy*, 2018, vol. 53, pp. 390–394.

Information about the authors

Irena O. Dolganova, Dr. Sc., Researcher, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation; dolganovaio@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8536-0501>

Igor M. Dolganov, Cand. Sc., Associate Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation; dolganovim@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-9848-4933>

Elena N. Ivashkina, Dr. Sc., Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation; ivashkinaen@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3984-1352>

Received: 15.05.2025

Revised: 03.06.2025

Accepted: 18.06.2025

УДК 622.692.4.07
DOI: 10.18799/24131830/2025/7/4850
Шифр специальности ВАК: 2.8.5
Научная статья

Технология профилактического поворота трубопровода, подверженного канавочной коррозии

Т.С. Султанмагомедов[✉], С.М. Султанмагомедов, Х.Ш. Шамилов, А.Р. Урманова

Уфимский государственный нефтяной технический университет, Россия, г. Уфа

[✉]sultanmaga@ya.ru

Аннотация. Актуальность. Предложена методика моделирования технологических параметров профилактического поворота трубопровода, подверженного канавочному износу. Такой поворот производится для выведения канавки из зоны интенсивной коррозии. Для проведения профилактического поворота необходимо знать геометрические характеристики канавки, свойства грунтов, глубину залегания трубопровода, скорость коррозии, рабочее давление в трубопроводе. Для поворота, без разрушения трубопровода, на заданный угол необходимо оценить усилия обжатия захватывающим устройством, крутящий момент, прикладываемый к трубопроводу, и расстояние между захватывающими устройствами. Исследование направлено на создание метода, который позволит оперативно определить расстояние между захватными устройствами и силу, необходимую для поворота трубопровода на требуемый угол без риска возникновения пластических деформаций в трубопроводе или потери его прочности и устойчивости. **Цель:** разработка конечно-элементной модели трубопровода для моделирования профилактического поворота и сравнение результатов моделирования с полевым экспериментом. **Объекты:** подземные промысловые трубопроводы, подверженные канавочному износу. **Методы:** математическое моделирование; моделирование методом конечных элементов в программном комплексе ANSYS; методы строительной механики и механики грунтов; планирование эксперимента, полевой эксперимент. **Результаты.** Приведено сравнение результатов полевого эксперимента по повороту на заданный угол с результатами моделирования. В полевом эксперименте производился поворот трубопровода 219×5,0 длиной 146,4 м на угол 28,77° с помощью двух захватывающих механизмов. Моделирование проводилось в программном комплексе ANSYS, сравнение моделирования и эксперимента проводилось по углам поворота в характерных сечениях, для сечения X=21 м, $\varphi_{\text{эксп}}=23^\circ$, $\varphi_{\text{числ}}=25^\circ$; для сечения X=60,2 м, $\varphi_{\text{эксп}}=21^\circ$, $\varphi_{\text{числ}}=24^\circ$. Также получено напряженное состояние в самом опасном сечении трубопровода с учетом краевого эффекта, такой точкой являлся участок, примыкающий к месту захвата поворотным устройством.

Ключевые слова: напряженно-деформированное состояние, ручейковая коррозия, канавочный износ, промысловый трубопровод, захватное устройство

Для цитирования: Технология профилактического поворота трубопровода, подверженного канавочной коррозии / Т.С. Султанмагомедов, С.М. Султанмагомедов, Х.Ш. Шамилов, А.Р. Урманова // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 7. – С. 143–155. DOI: 10.18799/24131830/2025/7/4850

UDC 622.692.4.07
DOI: 10.18799/24131830/2025/7/4850
Scientific paper

Technology of preventive turnaround of pipelines subject to groove corrosion

T.S. Sultanmagomedov[✉], S.M. Sultanmagomedov, Kh.Sh. Shamilov, A.R. Urmanova

Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russian Federation

[✉]sultanmaga@ya.ru

Abstract. Relevance. The paper proposes a methodology for modeling the technological parameters of preventive turning of a pipeline subject to groove corrosion. Such a turning is performed in order to remove the groove from the zone of intensive corrosion. To perform a preventive turnaround, it is necessary to know the geometric characteristics of the groove, soil properties, depth of the pipeline, corrosion rate, and operating pressure in the pipeline. In order to turn without destroying the pipeline to a given angle, it is necessary to estimate the gripping force, the torque applied to the pipeline and the distance between the gripping devices. The research is aimed at creating a method that will allow for the rapid determination of the distance between gripping devices and the force required to rotate the pipeline to the required angle without the risk of plastic deformation in the pipeline or loss of its strength and stability. **Aim.** Development of a finite element model of the pipeline for simulation of preventive turning and comparison of simulation results with field experiments. **Objects.** Underground field pipelines subject to groove corrosion. **Methods.** Mathematical modeling; finite element modeling in ANSYS software; methods of structural mechanics and soil mechanics; experiment planning, field experimentation. **Results.** The paper presents a comparison of the results of the field experiment on turning at a given angle with the results of modeling. In the field experiment the 219×5.0 pipeline with a length of 146.4 m was rotated at an angle of 28.77° using two gripping mechanisms. Modeling was carried out in the ANSYS software package, the comparison of modeling and experiment was carried out by the rotation angles in characteristic sections, for the section $X=21$ m, $\varphi_{\text{exp}}=23^\circ$, $\varphi_{\text{cal}}=25^\circ$; for the section $X=60.2$ m, $\varphi_{\text{exp}}=21^\circ$, $\varphi_{\text{cal}}=24^\circ$. The stress state in the most dangerous cross-section of the pipeline was also calculated taking into account the edge effect, such point was the section adjacent to the point of gripping by the rotary device.

Keywords: stress-strain state, groove corrosion, groove wear, field pipeline, gripping device

For citation: Sultanmagomedov T.S., Sultanmagomedov S.M., Shamilov Kh.Sh., Urmanova A.R. Technology of preventive turnaround of pipelines subject to groove corrosion. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 7, pp. 143–155. DOI: 10.18799/24131830/2025/7/4850

Введение

Большинство стальных трубопроводов для сбора нефти с промыслов подвержены интенсивной внешней и внутренней коррозии. Внутренняя коррозия протекает значительно быстрее, иногда в десятки раз превышая скорость коррозии внешней поверхности [1]. Интенсивность внутренней коррозии определяется концентрацией и составом минеральных солей, присутствующих в пластовой воде, которая транспортируется вместе с нефтью до места очистки последней от механических примесей [2]. Также существенное влияние на скорость коррозии оказывают сероводород и углекислый газ, присутствующие в нефти [3]. Особенно сильно на скорость коррозии влияет кислород. Таким образом, основной причиной отказов промысловых трубопроводов является внутренняя коррозия – 91 %, наружная коррозия – 4 %, строительные дефекты – 3 %, нарушение правил эксплуатации – 1 %, прочие причины – 1 %.

За последние 15 лет на нефте- и газопроводах в зарубежной практике произошло более 10000 аварий, что подчеркивает важность мер безопасности для таких объектов. Исследователями были предложены предиктивные модели для прогнозирования различных параметров отказа из-за большого количества факторов, влияющих на надежность промысловых трубопроводов.

Ввиду малого срока эксплуатации трубы для промысловых трубопроводов производятся из относительно дешевой стали Ст20, трубопроводы проложены преимущественно подземно или наземно в обваловании. Большое количество отказов трубопроводов происходят по нижней образующей из-за

дефектов в виде протяженных бороздок и канавок, глубина таких канавок может достигать 4–5 мм. Частота отказов по причине таких дефектов в зависимости от месторождения достигает 70 %. На скорость образования и увеличения глубины канавочной коррозии влияет давление внутри трубопровода, агрессивность среды [4], а также количество циклов работы трубопровода и угол его наклона.

Разработке методов увеличения долговечности и надежности промысловых трубопроводов посвящено большое количество работ. Основными работами, методы которых рассмотрены в статье, являются [5, 6]. Для рационального применения методов предотвращения канавочного износа трубопровода, используется неразрушающий контроль дефектных участков с канавочным износом, некоторые виды контроля предложены в работах [7–9]. Способ разрушающего контроля предложен в работах [10, 11], исследования проводились основываясь на том, что для процесса выноса металла по нижней образующей необходим определенный угол наклона трубопровода, такой, что механические примеси «шлифуют» поверхность трубопровода, а не выносятся потоком; ускоряет процесс образования канавки наличие дефектов, таких как риска или царапина на внутренней поверхности, агрессивная внутренняя среда, обогащенная кислородом, наличие солей в продукте, а также напряженное состояние трубопровода. В статье [12] представлен обзор методов контроля за развитием коррозионных дефектов, а также предложен метод борьбы с солевыми отложениями, которые сокращают срок службы промыслового трубопровода. Оценка коррозионных повреждений включает тща-

тельное изучение дефектов с использованием ультразвуковой толщинометрии (УЗТ) не менее чем в 12 точках в сечении, каждые 0,5 м в зоне предполагаемого утоньшения. Определение таких зон предполагается по результатам УЗТ нижней образующей трубопровода, также местоположение зон с повышенной скоростью коррозии определяется по гидравлическим моделям двухфазных потоков и поиском застойных зон.

В последнее время активно разрабатываются предиктивные и статистические методы превентивной борьбы с канавочным износом: разрабатываются аналитические модели для расчета НДС [13] и статистические модели на основе непараметрического прогнозирования [14], критериев приемлемости риска [15], стохастического анализа [16].

Остаточный срок службы трубопроводов с канавочным износом оценивается на основе скорости коррозии – отношения глубины образовавшейся «канавки» к времени начала эксплуатации трубопровода. В этом случае предполагается, что в будущем «канавка» будет углубляться с той же скоростью в течение всего оставшегося периода эксплуатации трубопровода [17]. Однако иногда опыт эксплуатации нефтепромысловых трубопроводов показывает, что оставшееся время безопасной эксплуатации гораздо меньше расчетного. В статье [18] такое несоответствие объясняется ускорением скорости коррозии канавки в процессе ее углубления за счет увеличения уровня механических напряжений в окружающем металле, что интенсифицирует процесс коррозии в результате механохимического воздействия.

Увеличение срока эксплуатации промысловых трубопроводов обеспечивается путем применения мероприятий по борьбе с внутренней и наружной коррозией. Для борьбы с наружной коррозией применяются изоляционные покрытия, включая битумные, полимерные и на основе новых материалов; электрохимическая защита [19], включая катодную, анодную и электродренажную.

Для борьбы с внутренней коррозией используется воздействие на перекачиваемый продукт (технологический способ, ингибиторная защита, магнитные устройства, подготовка нефти на промыслах [20]). Также применяются внутренние изоляционные покрытия (полимерные, лакокрасочные, на основе новых материалов). Возможно изменение конструкции трубопровода, а именно, применение неметаллических трубопроводов, многослойных и армированных труб, подбор коррозионностойких сталей [21].

В зависимости от условий эксплуатации и технологических особенностей многие из предложенных методов могут оказаться неэффективными [22]. Наиболее оправданным, безопасным и экономичным оказывается применение стальных трубопроводов.

В статье рассматривается такой метод борьбы с внутренней коррозией, как профилактические мероприятия или профилактический ремонт методом поворота.

Подробно остановимся на последнем методе увеличения безаварийного срока эксплуатации трубопровода. В диссертации [6] предложен профилактический ремонт методом поворота, который подразумевает вырезку и поворот относительно оси пораженного участка трубопровода без замены самого трубопровода. Цель такого поворота – вывести образовавшуюся канавку из зоны скопления механических примесей [6]. Поворот трубопровода осуществляется путем передачи крутящего момента M_x захватными устройствами (ЗУ), расположенными на некотором расстоянии друг от друга [6] (рис. 1). Преимущество такого метода заключается в минимальных земляных работах, требуется лишь шурфовка в местах приложения крутящего момента. Расчетная схема приложения крутящего момента с помощью ЗУ показана на рис. 2. В зависимости от вида канавочной коррозии (шпоночной, овальной и серповидной), глубины и ширины дефекта может потребоваться поворот на различный угол, который будет уменьшаться по мере увеличения расстояния от места приложения крутящего момента.

ЗУ устанавливается на зачищенный стальной трубопровод. Длина $b_{\text{захв}}$ определяется исходя из конструкции ЗУ. Далее происходит обжатие трубопровода давлением q по всему периметру. Приложенный момент M_x возникает от действия силы T на плечо $h_{\text{пл}}$ (рис. 1), данный момент m_x равномерно распределен по площади захвата. Если рассмотреть точку на поверхности трубы, то в данной точке от давления q возникает усилие обжатия $F_{\text{обж}}$; в обратном направлении действует реакция N . При выполнении поворота по поверхности контакта от усилия в точке $F_{\text{кр}}$ возникает сила трения $F_{\text{тр}}$. В рассмотренной точке справедливо:

$$F_{\text{обж}} = N;$$

$$F_{\text{тр}} = F_{\text{кр}};$$

$$F_{\text{тр}} = \mu N = \mu F_{\text{обж}}.$$

Значит:

$$F_{\text{кр}} = \mu F_{\text{обж}}.$$

Из условия, что

$$F_{\text{обж}} = q\pi D b_{\text{захв}}$$

и

$$F_{\text{кр}} = \frac{m_x}{R} = \frac{2m_x}{D_{\text{вн}}},$$

получаем:

$$\frac{2m_x}{D_{\text{вн}}} = \mu q \pi D b_{\text{захв}} \rightarrow q = \frac{2m_x}{D_{\text{вн}}^2 \mu \pi b_{\text{захв}}}.$$

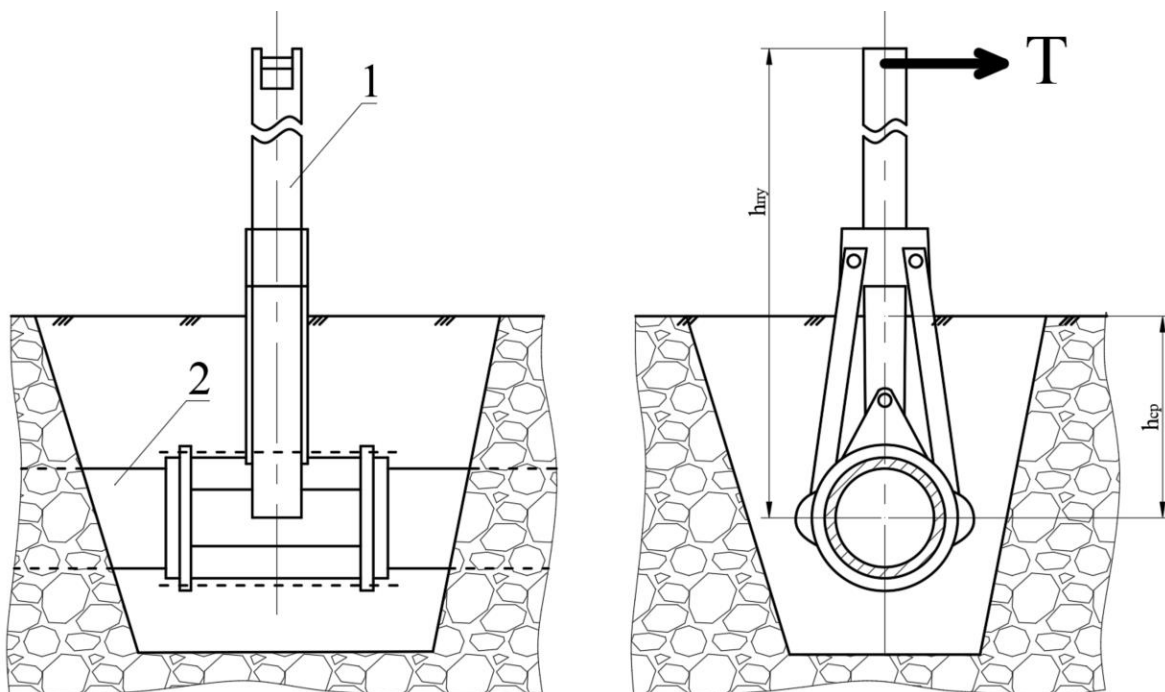


Рис. 1. Схематическое отображение метода профилактического поворота без вскрытия траншеи: 1 – захватное устройство, 2 – трубопровод, h_{ny} – высота стрелы ЗУ, T – усилие от поворотного механизма (экскаватора) [6]

Fig. 1. Schematic representation of the method of preventive turning without trench opening: 1 – gripping device, 2 – pipeline, h_{ny} – height of the sounder boom, T – force from the turning mechanism (excavator) [6]

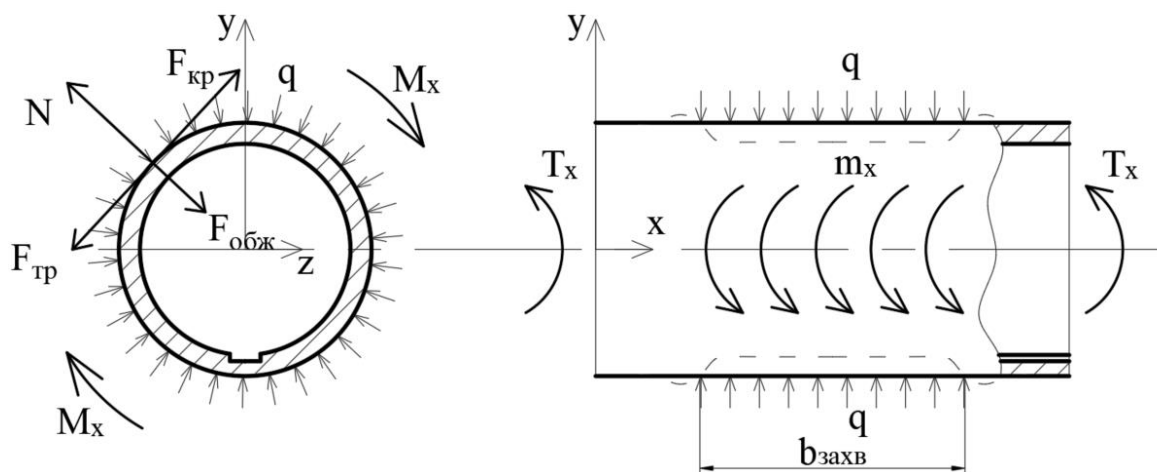


Рис. 2. Расчетная схема приложения крутящего момента к трубопроводу. Нагрузки, граничные условия

Fig. 2. Calculation scheme of torque application to the pipeline. Loads, boundary conditions

При выполнении профилактического поворота трубопровод рассматривается как стержень трубчатого сечения. Помимо крутящего момента, передаваемого от ЗУ, трубопровод испытывает внешнее местное давление со стороны ЗУ, а также поперечный изгиб. Нормативные документы предполагают определение работоспособности трубопровода по I и II предельным состояниям. Исходя из расчета по предельным состояниям первой группы, канавочный износ влияет на прочность конструкции трубопровода и устойчивость формы сечения трубо-

провода. Расчет по второму предельному состоянию ставит условие, что максимальные напряжения не должны превышать предела текучести стали трубопровода. При этом нормы расчета на прочность, жесткость и устойчивость не учитывают, что гипотеза плоских сечений Бернулли не справедлива при совместном действии упругопластического изгиба и кручения, так как при деформировании граница пластической области изменяется.

Также в работе [6] предложена методика аналитического расчета возможных сочетаний нагрузок

и граничных условий. В работе [23] выполнен расчет методом конечных элементов по определению напряжений от действия давления в трубопроводе с развитым канавочным дефектом различной формы и глубины. Результаты расчета сравнивались с результатами, полученными в [24, 25], где исследовалась зависимость напряженно-деформированного состояния плоского кольцевого сечения от величины давления и геометрических характеристик дефекта. Существуют несогласованности между моделированием деформированного состояния трубопроводов и экспериментами. Так, в работах [24, 25] происходит деформирование «внутри» в месте канавочного дефекта, что не соответствует реальности. Реальный случай разрыва из-за дефекта показан на рис. 3, как видно по рисунку деформация и последующий разрыв происходит наружу.



Рис. 3. Разрыв трубопровода по причине наличия канавочного износа

Fig. 3. Pipeline rupture due to groove corrosion

Как показывают натурные наблюдения, глубина и ширина дефекта разнится по длине трубопровода. Поэтому необходим инструмент для оценки НДС трубопровода на участке трубопровода конечной

длины с разными толщинами стенок в сечениях, как это сделано в работах [26, 27] на примере расчета ректификационной колонны. Сложность такого расчета заключается в моделировании разнотолщинности по длине и сечениям для одной оболочки программными средствами. Также представляют интерес направление и условия образования трещины оболочки в месте дефекта. В 2D-постановке задача образования трещины с локальным динамическим перестроением сетки решена в [23] в ПО ANSYS. Также имеется модель раскрытия трещины в ПО Abacus для 3D-модели [28], однако в работе приведен пример развития трещины при напряжениях, превышающих предел прочности, в то время как в случае с промышленными трубопроводными системами мы имеем дело с циклическим нагружением, не достигая предела прочности. Также предложены методы обработки стали для повышения прочностных характеристик [29, 30], данную технологию можно использовать на ответственных узлах элементов трубопроводов.

При проведении профилактического поворота помимо внутреннего давления немаловажным является напряженно-деформированное состояние трубопровода от действия температурного перепада и изгиба. Моделирование НДС от действия различных температурных перепадов, радиусов изгиба при различных длинах заземления проведено в работе [31]. Зависимость касательных напряжений, которые влияют на степень заземления трубопровода, от температуры и влажности представлена в [32]. Для определения НДС трубопровода необходимо учитывать его начальную кривизну [33].

Целью данного исследования является разработка методики расчета НДС промышленного трубопровода при профилактическом повороте в условиях мерзлых грунтов.

Задачи исследования:

- 1) анализ напряжений от действия механического ЗУ методом конечных элементов при выполнении поворота и разработка рекомендаций по технологическим характеристикам ЗУ;
- 2) разработка конечно-элементной модели на основе проведенного ранее натурного эксперимента по повороту промышленного трубопровода, изложенного в [6];
- 3) анализ напряженно-деформированного состояния трубопровода в области канавки вблизи ЗУ при проведении профилактического поворота трубопровода.

Методы исследования

Поворот трубопровода предполагается производить гидравлическим ЗУ. Данное устройство проще в изготовлении и применении, однако оно не автоматизировано. Также имеется патенты на механи-

ческое ЗУ. Усилие T (рис. 2) создается с помощью силового механизма (экскаватор). Конструктивная схема гидравлического ЗУ и ее реализация при проведении испытания в полевых условиях приведены на рис. 4. Диаметр трубопровода составил 219 мм и толщина стенки 5 мм. Трубопровод имеет следующие характеристики:

- диаметр трубопровода $D_n=219$ мм;
- толщина стенки трубопровода $t=5$ мм;
- плотность грунта $\rho=2000$ кг/м³;
- глубина от дневной поверхности до верхней образующей трубопровода $h_0=0,7$ м;
- срок эксплуатации трубопровода 5 лет;
- трубопровод опорожнен, давление $p=0$ МПа;
- предел текучести стали при кручении $[\tau]=206$ МПа;
- модуль сдвига $G=80$ ГПа;
- ширина серповидной канавки $b=50$ мм, глубина канавки 2 мм;
- минимально необходимый угол поворота начального сечения 30° .

При подготовке проведения полевого эксперимента были выполнены мероприятия по описанию профиля участка трубопровода с определением изогнутых участков и глубины заложения трубопровода, ультразвуковая толщинометрия для установления возможных мест установки захвата и измерения геометрических характеристик дефектов. Далее были проведены расчеты по методикам, разработанным в [6], по расчету необходимой мощно-

сти для создания крутящего момента, а также расстояния между ЗУ (по первой и второй группе предельных состояний), исходя из этих данных был определен минимальный угол поворота в местах установки ЗУ. После этого выполнена шурфовка, очистка трубопровода от грунта и изоляции, установка ЗУ, измерение расстояния между ЗУ. Далее была выполнена установка измерительных шкал на сечения для установления угла поворота. Также необходима подготовка площадок для техники, выполняющей поворот. После поворота выполнены восстановительные мероприятия (изоляция трубопровода и засыпка шурфов).

На рис. 5 показано положение трубопровода в процессе его поворота. Между осями двух ЗУ, на которые усилия прикладывались с помощью троса и двух тракторов Т-150, расстояние составило 46,2 м. Проведение замеров осуществлялось в шести точках, показанных на рисунке, ЗУ располагались в первой и третьей точке. Красной линией показаны отметки верхней образующей. Общая длина участка составила 146,4 м. Поворот проводился последовательно, после завершения поворота первым механизмом измеренная величина на расстоянии 6 м от начального сечения составила 27° (линия 1), положение трубы фиксировалось. Пунктирной линией показано аналитически рассчитанное положение трубопровода после поворота первым ЗУ. После проведения поворота вторым ЗУ труба приняла положение линии 2.

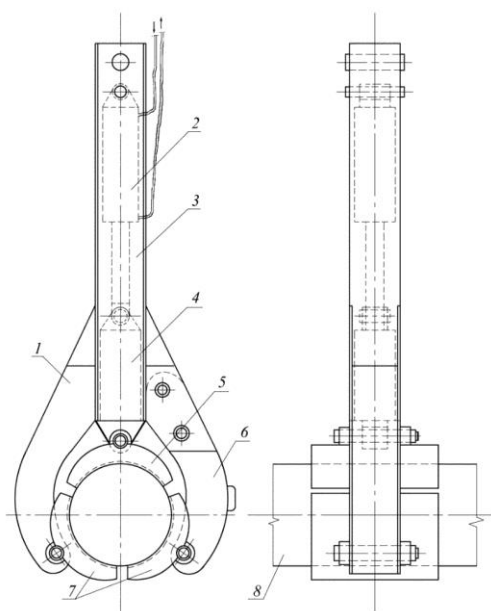


Рис. 4. Схема захватного устройства (а): 1 – корпус; 2 – гидроцилиндр; 3 – стойка корпуса; 4 – шток направляющий; 5, 7 – фрикционные накладки съемные; 6 – затвор замыкающий; 8 – трубопровод. Фотография ЗУ в полевых условиях (б)

Fig. 4. Scheme of the gripping device (a): 1 – body; 2 – hydraulic cylinder; 3 – body stand; 4 – guiding rod; 5, 7 – removable friction pads; 6 – closing gate; 8 – pipeline. Photo of the sounder in field conditions (b)

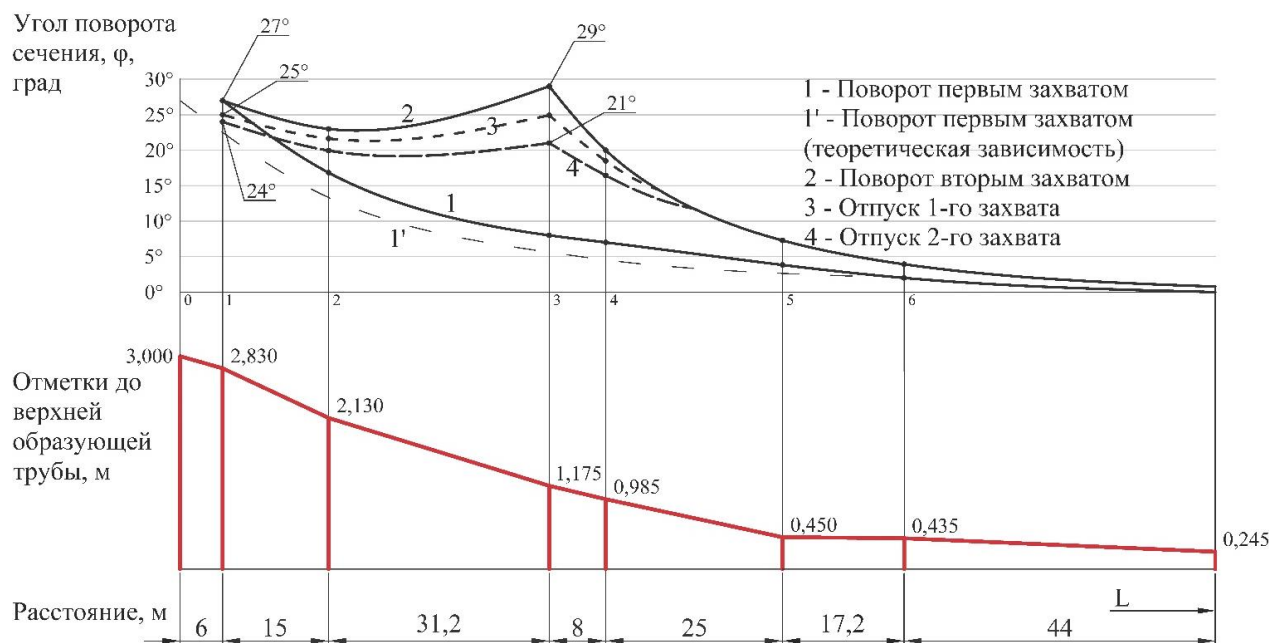


Рис. 5. Экспериментальная зависимость угловой деформации трубопровода по длине участка при последовательном повороте первым и вторым ЗУ

Fig. 5. Experimental dependence of angular deformation of the pipeline along the length of the section at consecutive rotation by the first and second sounders

При снятии усилия первого захвата угол поворота этого сечения составил 25° , после снятия второго захвата – 24° . Возврат первого и второго сечения в местах установки захвата (1 и 3 на схеме) составил 3° и 8° соответственно. В связи с упругим возвратом сечения при расчетах начального угла поворота рекомендуется применение поправочного коэффициента, равного 1,3.

Задача вращения цилиндрической оболочки является достаточно интересной с точки зрения приложения фрикционной нагрузки и взаимодействия двух тел, в нашем случае это ЗУ и трубопровод. Также, как говорилось ранее, при одновременном действии кручения и изгиба (или растяжения), закон Бернулли не справедлив. Интересно поведение цилиндрических оболочек различных длин, доведённых до предела текучести, их устойчивость [34], поэтому при выполнении поворота необходимо определить длину шурфа.

Для оценки силы трения разработаны различные конечно-элементные модели, которые оптимизируют поведение соединения для малых значений вращения и используются для прогнозирования общей прочности соединения с применением моделирования когезионной зоны и учета эффекта смятия в трубчатых сцеплениях [35]. Конечно-элементные модели, разработанные в [36], показывают методологию моделирования для оценки напряженного состояния в месте обжатия оболочки для композитных структур, армированных волокнами. Было рассмотрено множество примеров типичных металли-

ческих соединений при кручении для изучения взаимодействия между основными параметрами, определяющими работу соединения (т. е. толщина клея, толщина трубы и муфты, толщина/диаметр трубы и муфты, длина соединения и свойства материала) [37–39]. С точки зрения приложенных к конечно-элементной модели трубопровода нагрузок интересна модель, представленная в [40], имеется крутящий момент, локальное обжатие, изгиб, а также осевые силы, что характерно для проведенного эксперимента по повороту трубопровода.

На основании работ [34–40] при моделировании поворота трубопровода были заданы граничные условия (ГУ):

- трубопровод разбивался на элементы типа Shell, размер элемента (element size) 25 мм;
- жесткая заделка (fixed support) в конечном сечении трубопровода, $x=146,4$ м;
- принудительное вращение трубопровода вокруг оси x , ограничение степеней свобод для кручения вокруг осей y, z , ограничение линейных деформаций по осям x, y, z (revolute joint). Сечение с данным ГУ: $x=6$ м;
- принудительное вращение трубопровода вокруг оси x , ограничение степеней свобод для кручения вокруг осей y, z , ограничение линейных деформаций по осям x, y, z (revolute joint). Сечение с данным ГУ: $x=52,2$ м;
- ограничение деформаций по осям x, y, z для сечения $x=0$ м, возможность угловых деформаций по осям x, y, z ;

- упругое взаимодействие (elastic support) по всей площади трубы, за исключением мест захвата $k_0=30 \text{ МН/м}^3$.
Общее количество элементов модели 163968 шт.

Результаты исследования и их обсуждение

Результаты деформаций верхней образующей трубы по оси z угловых деформаций φ показаны на рис. 6. Угловые деформации найдены как $\arcsin(z/R)$, где R – внешний радиус трубопровода. Как видно по рисунку, характер изменения углов по длине соответствует измеренным значениям в ходе натурных экспериментов.

Результаты реактивных моментов в месте поворота:

- момент на ЗУ2 41280 Н*м;
- момент на ЗУ1 28047 Н*м.

Максимальные напряжения ожидаются в области максимального угла поворота в месте перехода

между захватом вторым ЗУ и свободной от ЗУ поверхности трубопровода. Для этой зоны смоделированы максимальные эквивалентные напряжения, возникающие в трубе, с учетом дефекта.

На рис.7 показано распределение эквивалентных напряжений по Мизесу при воздействии двух ЗУ. На рис. 7, а показаны напряжения при воздействии первого ЗУ, расположенного на расстоянии $x=6 \text{ м}$, максимальные напряжения без эффекта сингулярности составили 93 МПа в зоне дефекта. На рис. 7, б показаны напряжения при действии второго устройства, максимальные напряжения без эффекта сингулярности составили 136 МПа в зоне дефекта в сторону бесконечного конца. При этом максимальные напряжения на участке, близком ко второму ЗУ, между первым и вторым ЗУ, уменьшились. Это связано с изменением разницы углов поворота сечения в местах захвата.

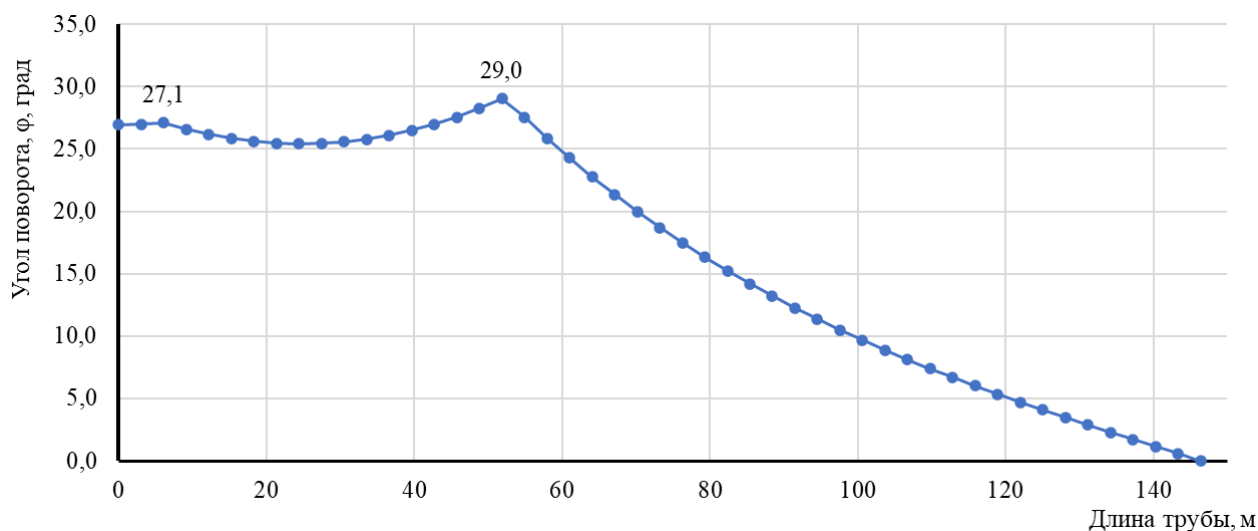


Рис. 6. Результаты экспериментального моделирования изменения угла φ в плоскости ZY при повороте двумя захватами

Fig. 6. Results of experimental modeling of the change in angle φ in the ZY plane when turning with two grippers

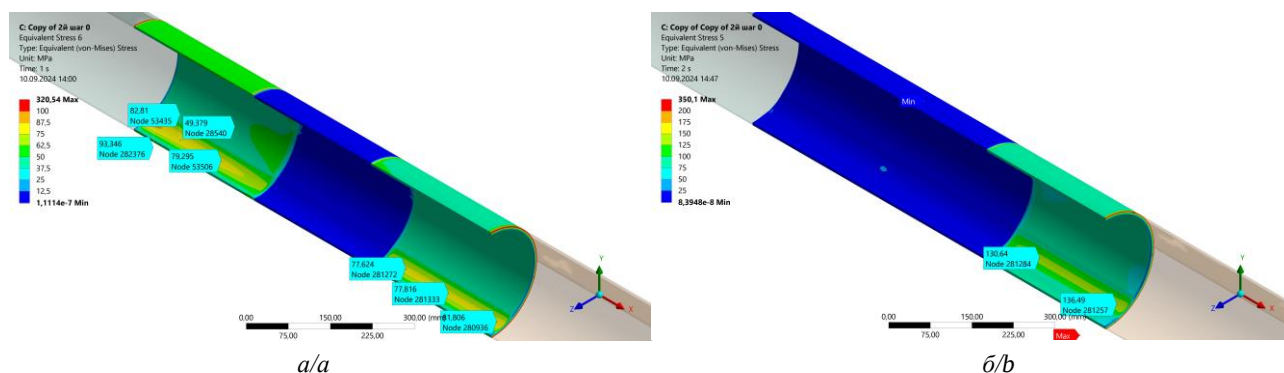


Рис. 7. Результаты моделирования НДС при воздействии: а) первого захвата; б) первого и второго захвата

Fig. 7. Results of Stress-Strain State modeling under the effect of: a) the first gripper; b) the first and the second gripper

Необходимо заметить, что в зонах, рассмотренных выше, не учитывается краевой эффект, что дает нам прибавление 82 % к максимальным напряжениям. При учете краевого эффекта напряжения в зоне с дефектом, примыкающие ко второму ЗУ максимальные напряжения очень близки с пределом текучести, что дает основание для мер по предварительному ультразвуковому контролю и поиску участков, наименее подверженных коррозии, с учетом оптимального расположения ЗУ исходя из минимизации напряженного состояния трубопровода.

Заключение

Технология профилактического поворота промысловых трубопроводов является рентабельным методом обеспечения долговечности промысловых трубопроводов. При проведении поворота необходим комплекс мероприятий по выявлению участков, требующих применения профилактических мер, экономическое и технологическое обоснования применения мер, а также технических положений для определения местоположения ЗУ, допустимых усилий обжатия, требуемого угла поворота и приложенного момента.

Для обоснования технических положений разработано три конечно-элементных модели по определению:

- максимального усилия обжатия различными видами ЗУ;
- положения и количества ЗУ в зависимости от характеристик грунта, требуемого угла поворота и усилий ЗУ;
- максимальных напряжений при выполнении поворота.

Разумеется, данные модели можно с достаточной точностью заменить на аналитические и экспериментальные модели, полученные в [6], однако в дальнейшем данные модели можно доработать для определения технологических характеристик профилактического поворота при наличии изогнутых участков трубопровода, для трубопроводов, проложенных в разных грунтах и имеющих различные комбинации дефектов, а также для трубопроводов, проложенных в тепловой изоляции или наземно и надземно.

Модель по определению положения и количества ЗУ в зависимости от характеристик грунта, требуемого угла поворота и усилий ЗУ была апро-

бирована на реальном полевом эксперименте, а сходимость значений углов поворота сечений показала хорошие результаты: сечение $X=21$ м, $\varphi_{\text{экс}}=23^\circ$, $\varphi_{\text{числ}}=25^\circ$; сечение $X=60,2$ м, $\varphi_{\text{экс}}=21^\circ$, $\varphi_{\text{числ}}=24^\circ$.

Погрешность в том числе связана с неучтенным изменением механических свойств по длине трубопровода, но точность является достаточной для утверждения о том, что необходимый угол был обеспечен.

Эквивалентные напряжения в месте захвата устройством трубы и в примыкающих участках с учетом краевого эффекта ($\sigma_{\text{экв}}=247$ МПа) меньше предела текучести рассматриваемой стали, однако перед поворотом необходимо проводить предварительную ультразвуковую толщинометрию в местах шурфования для определения минимального утоньшения трубопровода. При необходимости нужно иметь уточненную модель трубопровода в месте предполагаемой установки ЗУ, для этого необходим опросный лист, включающий в себя:

- по глубине залегания трубопровода;
- данные о толщине трубопровода и геометрических характеристиках дефекта по длине трубы;
- характеристики ЗУ (усилия обжатия, прикладываемый момент, коэффициент трения между трубой и ЗУ);
- информацию о необходимом угле для поворота;
- данные о расстоянии между ЗУ;
- прочностные характеристики стали трубопровода.

В полевых условиях после снятия всех ЗУ и засыпке трубопровода были проведены дополнительные исследования. Проводилась оценка изменения высотного положения оси трубопровода. Также была произведена вырезка катушки для оценки остаточных деформаций. По результатам проведенных исследований выявлено, что трубопровод сохранил свое проектное положение, в трубопроводе отсутствуют остаточные деформации. В случае с моделированием пока невозможно оценить изменение проектного положения ввиду заданных граничных условий.

Дальнейшие исследования будут направлены на доработку технологии в условиях теплоизолированных трубопроводов, проложенных в условиях многолетнемерзлых и талых грунтов, а также имеющих кривизну.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Prevention of fire hazardous situations on field pipelines / I.F. Khafizov, T.V. Latypova, F.Sh. Khafizov, I.V. Ozden // Oil and Gas Business. – 2024. – Vol. 4. – P. 20–36. DOI: 10.17122/ogbus-2024-4-20-36
2. Клисенок Л.Б., Лапшин А.П., Кудрин Д.В. Вероятные причины образования ручейковой коррозии в промысловых нефтепроводах, выявленной при техническом диагностировании // Современная наука: актуальные проблемы и пути их решения. – 2015. – Т. 22. – № 9. – С. 58–61.
3. Corrosion and grooving corrosion behavior of the ERW Joint of the Q125 grade tube steel CO2 / L.D. Wang, F.L. Liu, Q.Y. Zhao, H.B. Wu // Journal of Iron and Steel Research International. – 2015. – Vol. 22. – № 10. – P. 943–948. DOI: 10.1016/S1006-706X(15)30094-7

4. Xu Y., Zhang Q., Chen H. Experimental study on erosion-corrosion of carbon steel in flowing NaCl solution of different pH // *Journal of Materials Research and Technology*. – 2022. – Vol. 20. – P. 4432–4451. DOI: 10.1016/j.jmrt.2022.09.012
5. Скоромный В.И. Разработка методов и средств повышения безопасности эксплуатации нефтесборных трубопроводов: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Уфа, 2004. – 24 с.
6. Султанмагомедов С.М. Обеспечение безопасной эксплуатации и долговечности промысловых трубопроводов, подверженных канавочному износу: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – Уфа, 2003. – 48 с.
7. Reliability assessments of corroded pipelines based on internal pressure – a review / R. Amaya-Gómez, M. Sánchez-Silva, E. Bastidas-Arteaga, F. Schoefs, F. Muñoz // *Engineering Failure Analysis*. Elsevier Ltd. – 2019. – Vol. 98. – P. 190–214. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2019.01.064
8. Study on grooving corrosion behavior of QT800 coiled tubing / F. Yan, Z. Li, Ch. Zhang, H. Wang // *AIP Adv.* – 2021. – Vol. 11. – № 4. DOI: 10.1063/5.0044098
9. El-Sayed M.H. Grooving corrosion of seam welded oil pipelines // *Case Stud Eng Fail Anal.* – 2014. – Vol. 2. – № 2. – P. 84–90. DOI: 10.1016/j.csefa.2014.05.002
10. Bolobov V., Popov G.G. Methodology for testing pipeline steels for resistance to grooving corrosion // *Journal of Mining Institute*. – 2021. – Vol. 252. – P. 854–860. DOI: 10.31897/PMI.2021.6.7
11. Коррозионное разрушение металла нефтегазопроводных труб в процессе эксплуатации и при лабораторных испытаниях / С.С. Петров, Р.А. Васин, Ж.В. Князева, Д.И. Андриянов, Е.С. Сургаева // *Нефтегазовое дело*. – 2020. – Т. 18. – № 4. – С. 102–112. DOI: 10.17122/ngdelo-2020-4-102-112
12. Konnov D. Prediction of corrosion defects in oil pipelines // *Universum: Technical sciences*. Siberian Academic Book LLC. – 2023. – Vol. 115. – № 10. DOI: 10.32743/unitech.2023.115.10.16180
13. Шаймухаметов М.Р. Напряжения в области канавочного разрушения трубопроводов // *Нефтегазовое дело*. – 2009. – Т. 2. – № 7. – С. 115–120.
14. Курасов О.А., Бурков П.В. Системный анализ конкурирующих рисков отказа технических систем на основе непараметрического прогнозирования // *Вестник ТГАСУ*. – 2024. – Т. 26. – № 2. – С. 93–103. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-2-93-103
15. Курасов О.А., Бурков П.В. Оценка заданного уровня надежности сложных технических систем на основе критериев приемлемости риска // *Вестник ТГАСУ*. – 2024. – Т. 26. – № 2. – С. 80–92. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-2-80-92
16. Курасов О.А., Бурков П.В. Стохастический анализ структурной надежности технических систем // *Вестник ТГАСУ*. – 2024. – Т. 26. – № 1. – С. 108–117. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-1-108-117
17. Болобов В.И., Жуikov И.В., Попов Г.Г. К влиянию напряженного состояния трубы на интенсивность питтинговой коррозии промысловых нефтепроводов // *Нефтегазовое дело*. – 2023. – Т. 21. – № 4. – С. 109–120. DOI: <https://doi.org/10.17122/ngdelo-2023-4-109-120>.
18. Development of the kinetic equation of the groove corrosion process for predicting the residual life of oil-field pipelines / G. Popov, V. Bolobov, I. Zhuikov, V. Zlotin // *Energies (Basel)*. Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). – 2023. – Vol. 16. – № 20. DOI: 10.3390/en16207067
19. Corrosion behavior of X80 steel with coupled coating defects under alternating current interference in alkaline environment / Z. Li, C. Li, H. Qian, J. Li, L. Huang, C. Du // *Materials*. – 2017. – Vol. 10. – № 7. – P. 1–11. DOI: 10.3390/ma10070720
20. О вкладе механохимического фактора в скорость протекания «ручейковой» коррозии промысловых нефтепроводов / В.И. Болобов, Г.Г. Попов, Е.А. Кривокрысенко, В.А. Злотин, И.В. Жуиков, Д.В. Гареев // *Технологии нефти и газа*. – 2020. – Т. 129. – № 4. – С. 3–9. DOI: 10.32935/1815-2600-2020-129-4-42-45
21. Попов Г.Г. Разработка метода защиты промысловых нефтепроводов от ручейковой коррозии подбором коррозионноустойчивых сталей: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – СПб, 2020. – 20 с.
22. Ovchinnikov K.A., Ermolina L.V. Methods for mitting corrosion in the oil and gas industry and cost optimization based on import substitution // *Economy, Governance and Lave Basis*. – 2020. – Vol. 4. – P. 19–25. DOI: 10.51608/23058641_2020_4_19
23. Расчет напряженно-деформированного состояния трубопроводов, подверженных канавочному износу методом конечных элементов / Т.С. Султанмагомедов, Т.М. Халиков, Р.Н. Бахтизин, С.М. Султанмагомедов // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2023. – Т. 334. – № 6. – С. 151–162. DOI: 10.18799/24131830/2023/6/4014.
24. Попов Д.В. Оценка безопасной эксплуатации оболочек с «канавочным износом» методом конечных элементов: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Уфа, 2004. – 24 с.
25. Исследование напряженно-деформированного состояния промысловых трубопроводов, подвергшихся воздействию ручейковой коррозии / П.В. Бурков, В.П. Бурков, Д.С. Фатьянов, В.Ю. Тимофеев // *Вестник Кузбасского государственного технического университета*. – 2018. – Т. 18. – № 3. – С. 5–12. DOI: 10.26730/1999-4125-2018-3-5-12
26. Modeling the impact of shell wall thickness thinning on the stress state / K. Abdrakhmanova, E. Yarmonov, P. Kulakov, R. Tlyasheva // *Journal of Physics: Conference Series*. IOP Publishing Ltd. – 2021. – Vol. 1889. – № 4. DOI: 10.1088/1742-6596/1889/4/042089
27. Абдрахманова К.Н. Прогнозирование предельного состояния обечаек аппаратов на основе цифровых моделей // *Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов*. – 2021. – Т. 5 (133). – С. 112–120. DOI: 10.17122/ntj-oil-2021-5-112-120
28. Верификация цифровой модели нагружением оболочки внутренним давлением до разрушения / К.Н. Абдрахманова, Р.Р. Тляшева, Д.Н. Шерматов, Р.О. Кадыров, В.А. Гафарова, Р.А. Гимаев // *Сетевое издание «Нефтегазовое дело»*. – 2022. – Т. 2. – С. 5–19. DOI: 10.17122/ogbus-2022-2-5-19
29. Improving safety during operation of gas turbine units / N.H. Abdrakhmanov, Z.A. Zakirova, M.N. Gurianova, K.N. Abdrakhmanov, Yu.N. Savicheva // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. IOP Publishing Ltd. – 2022. – V. 981. – № 3. DOI: 10.1088/1755-1315/981/3/032047

30. Abdrakhmanova K.N., Shabanova V.V., Abrakhmanov N.Kh. Application of modeling of the accident development process and risk assessment in order to ensure the safe operation of oil and gas facilities. *Safety of technogenic and natural systems // Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. – 2020. – Vol. 2. – P. 2–13. DOI: 10.23947/2541-9129-2020-2-2-13
31. Султанмагомедов Т.С. Влияние продольных перемещений трубопровода на напряженно-деформированное состояние при оттаивании участка многолетнемерзлого грунта // *Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов*. – 2022. – Т. 12. – № 4. – С. 331–339. DOI: 10.28999/2541-9595-2022-12-4-331-339.
32. Экспериментальные исследования сопротивления мерзлого грунта продольным перемещениям трубопровода при изменении температуры и влажности / Р.Н. Бахтизин, С.М. Султанмагомедов, Т.С. Султанмагомедов, Д.А. Гулин, А.Р. Урманова // *Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов*. – 2020. – Т. 10. – № 3. – С. 243–251. DOI: 10.28999/2541-9595-2020-10-3-243-251
33. Обоснование возможности оценки уровня изгибных напряжений в стенках труб магистральных газонефтепроводов определением его пространственного положения с поверхности грунта / А.А. Фирстов, Ж.Ю. Капачинских, В.А. Середенок, Э.А. Мамедова, Р.В. Агиней // *Наука и техника в газовой промышленности*. – 2020. – Т. 2. – С. 89–98.
34. Petrov M.V., Kibets A.I., Mikhailov B.V. Experimental studies of the stability of thin-walled cylindrical shells of medium length filled with bulk material under torsion // *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. – 2023. – Vol. 19. – P. 49–57. DOI: 10.22337/2587-9618-2023-19-3-49-57
35. Numerical study of flexible tubular metal-polymer adhesive joints / M.A. Dantas, R. Carbas, E.A.S. Marques, M.P.L. Parente, D. Kushner, L.F.M. da Silva // *The Journal of Adhesion*. – 2020. – Vol. 98 (2). – P. 131–153. DOI: 10.1080/00218464.2020.1822173
36. Das R.R., Pradhan B. Finite element based design and adhesion failure analysis of bonded tubular socket joints made with laminated FRP composites // *Journal of Adhesion Science and Technology*. – 2011. – Vol. 25 (1–3). – P. 41–67. DOI: 10.1163/016942410X508073
37. Effects of staged cooling in shrink-fitting compounded cylinders / N.O. Collie, A.K. Kaw, G.H. Besterfield, M.M. Rahman // *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*. – 2006. – Vol. 41 (5). – P. 349–361. DOI: 10.1243/03093247jsa126
38. Geometrical and material optimization of tensile loaded tubular adhesive joints using cohesive zone modelling / L.R.F. Ferreira, R.D.S.G. Campilho, R.J.B. Rocha, D.R. Barbosa // *The Journal of Adhesion*. – 2019. – Vol. 95 (5–7). – P. 425–449. DOI: 10.1080/00218464.2018.1551136
39. Nimje S.V., Panigrahi S.K. Strain energy release rate based damage analysis of functionally graded adhesively bonded tubular lap joint of laminated FRP composites // *The Journal of Adhesion*. – 2016. – Vol. 93 (5). – P. 389–411. DOI: 10.1080/00218464.2015.1077706
40. Shishesaz M., Tehrani S. Interfacial shear stress distribution in the adhesively bonded tubular joints under tension with a circumferential void or debond // *Journal of Adhesion Science and Technology*. – 2020. – Vol. 34 (11). – P. 1172–1205. DOI: 10.1080/01694243.2019.1701894

Информация об авторах

Тимур Султанмагомедович Султанмагомедов, кандидат технических наук, доцент кафедры проектирования и строительства объектов нефтяной и газовой промышленности, факультет трубопроводного транспорта, Уфимский государственный нефтяной технический университет, Россия, 450064, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1; sultanmaga@ya.ru. <https://orcid.org/0000-0002-4969-2808>

Султанмагомед Магомедтагирович Султанмагомедов, доктор технических наук, академик РАЕН, профессор кафедры проектирования и строительства объектов нефтяной и газовой промышленности, декан факультета трубопроводного транспорта, Уфимский государственный нефтяной технический университет, Россия, 450064, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1; ftt2010@mail.ru. <https://orcid.org/0000-0001-6111-1319>

Хирамагомед Шехмагомедович Шамилов, кандидат технических наук, доцент кафедры гидрогазодинамики трубопроводных систем и гидромашин, факультет трубопроводного транспорта, Уфимский государственный нефтяной технический университет, Россия, 450064, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1; khiramagomed@mail.ru. <https://orcid.org/0000-0001-8190-6389>

Аделия Радиковна Урманова, ассистент кафедры гидрогазодинамики трубопроводных систем и гидромашин, факультет трубопроводного транспорта, Уфимский государственный нефтяной технический университет, Россия, 450064, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1; urm.ar@yandex.ru. <https://orcid.org/0000-0001-7521-6031>

Поступила в редакцию: 02.10.2024

Поступила после рецензирования: 15.10.2024

Принята к публикации: 18.06.2025

REFERENCES

1. Khafizov I.F., Latypova T.V., Khafizov F.Sh., Ozden I.V. Prevention of fire hazardous situations on field pipelines. *Oil and Gas Business*, 2024, vol. 4. pp. 20–36. DOI: 10.17122/ogbus-2024-4-20-36
2. Klisenko L.B., Lapshin A.P., Kudrin D.B. Probable causes of stream corrosion formation in field oil pipelines revealed during technical diagnostics. *Modern Science: Actual Problems and Ways of Their Solution*, 2015, vol. 22, no. 9, pp. 58–61. (In Russ.)

3. Wang L.D., Liu F.L., Zhao Q.Y., Wu H.B. CO₂ corrosion and grooving corrosion behavior of the ERW joint of the Q125 grade tube steel. *Journal of Iron and Steel Research International*, 2015, vol. 22, no. 10, pp. 943–948. DOI:10.1016/S1006-706X(15)30094-7
4. Xu Y., Zhang Q., Chen H. Experimental study on erosion-corrosion of carbon steel in flowing NaCl solution of different pH. *Journal of Materials Research and Technology. Elsevier Editor Ltda*, 2022, vol. 20, pp. 4432–4451. DOI: 10.1016/j.jmrt.2022.09.012
5. Skoromny V.I. *Development of methods and means to increase the safety of oil gathering pipelines operation*. Cand. Diss. Abstract. Ufa, 2004. 24 p. (In Russ.)
6. Sultanmagomedov S.M. *Ensuring safe operation and durability of field pipelines subjected to groove wear*. Cand. Diss. Abstract. Ufa, 2003. 48 p. (In Russ.)
7. Amaya-Gómez R., Sánchez-Silva M., Bastidas-Arteaga E., Schoefs F., Muñoz F. Reliability assessments of corroded pipelines based on internal pressure – a review. *Engineering Failure Analysis*, 2019, vol. 98, pp. 190–214. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2019.01.064
8. Yan F., Li Z., Zhang Ch., Wang H. Study on grooving corrosion behavior of QT800 coiled tubing. *AIP Adv*, 2021, vol. 11, no. 4. DOI: 10.1063/5.0044098
9. El-Sayed M.H. Grooving corrosion of seam welded oil pipelines. *Case Stud Eng Fail Anal*, 2014, vol. 2, no. 2, pp. 84–90. DOI: 10.1016/j.csefa.2014.05.002
10. Bolobov V., Popov G.G. Methodology for testing pipeline steels for resistance to grooving corrosion. *Journal of Mining Institute*, 2021, vol. 252, pp. 854–860. DOI: 10.31897/PMI.2021.6.7
11. Petrov S.S., Vasin R.A., Knyazeva J.V., Andriyanov D.I., Surgaeva E.S. Metal corrosion destruction of oil and gas pipelines during operation and laboratory tests. *Petroleum Engineering*, 2020, vol. 18, no. 4, pp. 102–112. DOI: 10.17122/ngdelo-2020-4-102-112
12. Konnov D. Prediction of corrosion defects in oil pipelines. *Universum: Technical sciences. Siberian Academic Book LLC*, 2023, vol. 115, no. 10, pp. DOI: 10.32743/unitech.2023.115.10.16180
13. Shaimukhametov M.R. Stresses in the area of groove fracture of pipelines. *Oil and gas business*, 2009, vol. 2, no. 7, pp. 115–120. (In Russ.)
14. Kurasov O.A., Burkov P.V. System analysis of competing risks of failure of technical systems on the basis of nonparametric forecasting. *Bulletin of TGASU*, 2024, vol. 26, no. 2, pp. 93–103. (In Russ.) DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-2-93-103
15. Kurasov O.A., Burkov P.V. Estimation of the given level of reliability of complex technical systems on the basis of risk acceptability criteria. *Bulletin of TGASU*, 2024, vol. 26, no. 2, pp. 80–92. (In Russ.) DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-2-80-92
16. Kurasov O.A., Burkov P.V. Stochastic analysis of structural reliability of technical systems. *Bulletin of TGASU*, 2024, vol. 26, no. 1, pp. 108–117. (In Russ.) DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-1-108-117
17. Bolobov V.I., Zhuikov I.V., Popov G.G. Influence of pipe stressed state on intensity of pitting corrosion of field oil pipelines. *Oil and Gas Business*, 2023, vol. 21, no. 4, pp. 109–120. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.17122/ngdelo-2023-4-109-120>
18. Popov G., Bolobov V., Zhuikov I., Zlotin V. Development of the kinetic equation of the groove corrosion process for predicting the residual life of oil-field pipelines. *Energies (Basel). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)*, 2023, vol. 16, no. 20. DOI: 10.3390/en16207067
19. Li Z., Li C., Qian H., Li J., Huang L., Du C. Corrosion behavior of X80 steel with coupled coating defects under alternating current interference in alkaline environment. *Materials*, 2017, vol. 10, no. 7, pp. 1–11. DOI: 10.3390/ma10070720
20. Bolobov V.I., Popov G.G., Krivokrysenko E.A., Zlotin V.A., Zhuikov I.V., Gareev D.V. On the contribution of mechanochemical factor to the rate of “stream” corrosion of field oil pipelines. *Oil and Gas Technologies*, 2020, vol. 129, no. 4, pp. 3–9. (In Russ.) DOI: 10.32935/1815-2600-2020-129-4-42-45
21. Popov G.G. *Development of a method for protection of field oil pipelines from stream corrosion by selection of corrosion-resistant steels*. Cand. Diss. Abstract. St Petersburg, 2020. 20 p. (In Russ.)
22. Ovchinnikov K.A., Ermolina L.V. Methods for mitigating corrosion in the oil and gas industry and cost optimization based on import substitution. *Economy, Governance and Lave Basis*, 2020, vol. 4, pp. 19–25. DOI: 10.51608/23058641_2020_4_19
23. Sultanmagomedov T.S., Khalikov T.M., Bakhtizin R.N., Sultanmagomedov S.M. Calculation of stress-strain state of pipelines subjected to groove wear by finite element method. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2023, vol. 334, no. 6, pp. 151–162. (In Russ.) DOI: 10.18799/24131830/2023/6/4014
24. Popodko D.V. *Estimation of safe operation of shells with “groove wear” by the finite element method*. Cand. Diss. Abstract. Ufa, 2004. 24 p. (In Russ.)
25. Burkov P.V., Burkov V.P., Fatyanov D.S., Timofeev V.Yu. Investigation of stress-strain state of field pipelines exposed to stream corrosion. *Bulletin of Kuzbass State Technical University*, 2018, vol. 18, no. 3, pp. 5–12. (In Russ.) DOI: 10.26730/1999-4125-2018-3-5-12
26. Abdrakhmanova K., Yarmonov E., Kulakov P., Tlyasheva R. Modeling the impact of shell wall thickness thinning on the stress state. *Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing Ltd*, 2021, vol. 1889, no. 4. DOI: 10.1088/1742-6596/1889/4/042089
27. Abdrakhmanova K. N. Prediction of limit state of apparatus shells on the basis of digital models. *Problems of gathering, treatment and transportation of oil and oil products*, 2021, vol. 5 (133), pp. 112–120. (In Russ.) DOI: 10.17122/ntj-oil-2021-5-112-120
28. Abdrakhmanova K.N., Tlyasheva R.R., Shermatov D.N., Kadyrov R.O., Gafarova V.A., Gimaev R.A. Verification of the digital model by loading the shell with internal pressure before fracture. *Network edition «Neftegazovoye delo» (Oil and Gas Business)*, 2022, vol. 2, pp. 5–19. (In Russ.) DOI: 10.17122/ogbus-2022-2-5-19
29. Abdrakhmanov N.H., Zakirova Z.A., Gurianova M.N., Abdrakhmanov K.N., Savicheva Yu.N. Improving safety during operation of gas turbine units. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing Ltd*, 2022, vol. 981, no. 3. DOI: 10.1088/1755-1315/981/3/032047

30. Abdrakhmanova K.N., Shabanova V.V., Abrahmanov NKh. Application of modeling of the accident development process and risk assessment in order to ensure the safe operation of oil and gas facilities. *Safety of technogenic and natural systems. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2020, vol. 2, pp. 2–13. DOI: 10.23947/2541-9129-2020-2-2-13
31. Sultanmagomedov T.S. Influence of longitudinal displacements of the pipeline on the stress-strain state during thawing of perennially frozen ground. *Science and Technologies of Pipeline Transportation of Oil and Oil Products*, 2022, vol. 12, no. 4, pp. 331–339. (In Russ.) DOI: 10.28999/2541-9595-2022-12-4-331-339.
32. Bakhtizin R.N., Sultanmagomedov S.M., Sultanmagomedov T.S., Gulin D.A., Urmanova A.R. Experimental studies of frozen ground resistance to longitudinal movements of the pipeline under temperature and humidity changes. *Science and Technologies of Pipeline Transportation of Oil and Oil Products*, 2020, vol. 10, no. 3. pp. 243–251. (In Russ.) DOI: 10.28999/2541-9595-2020-10-3-243-251
33. Firstov A.A., Kapachinskikh J.Y., Seredenok V.A., Mamedova E.A., Aginei R.V. Justification of the possibility of estimation of bending stress level in pipe walls of main gas and oil pipelines by determination of its spatial position from the ground surface. *Science and Technology in Gas Industry*, 2020, vol. 2, pp. 89–98. (In Russ.)
34. Petrov M.V., Kibets A.I., Mikhailov B.V. Experimental studies of the stability of thin-walled cylindrical shells of medium length filled with bulk material under torsion. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*, 2023, vol. 19, pp. 49–57. DOI: 10.22337/2587-9618-2023-19-3-49-57
35. Dantas M.A., Carbas R., Marques E.A.S., Parente M.P.L., Kushner D., Da Silva L.F.M. Numerical study of flexible tubular metal-polymer adhesive joints. *The Journal of Adhesion*, 2020, vol. 98 (2), pp. 131–153. DOI: 10.1080/00218464.2020.1822173
36. Das R.R., Pradhan B. Finite element based design and adhesion failure analysis of bonded tubular socket joints made with laminated FRP composites. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2011, vol. 25 (1–3), pp. 41–67. DOI: 10.1163/016942410X508073
37. Collier N.O., Kaw A.K., Besterfield G.H., Rahman M.M. Effects of staged cooling in shrink-fitting compounded cylinders. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 2006, vol. 41 (5), pp. 349–361. DOI: 10.1243/03093247jsa126
38. Ferreira L.R.F., Campilho R.D.S.G., Rocha R.J.B., Barbosa D.R. Geometrical and material optimization of tensile loaded tubular adhesive joints using cohesive zone modelling. *The Journal of Adhesion*, 2019, vol. 95 (5–7), pp. 425–449. DOI: 10.1080/00218464.2018.1551136
39. Nimje S.V., Panigrahi S.K. Strain energy release rate based damage analysis of functionally graded adhesively bonded tubular lap joint of laminated FRP composites. *The Journal of Adhesion*, 2016, vol. 93 (5), pp. 389–411. DOI: 10.1080/00218464.2015.1077706
40. Shishesaz M., Tehrani, S. Interfacial shear stress distribution in the adhesively bonded tubular joints under tension with a circumferential void or debond. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2020, vol. 34 (11), pp. 1172–1205. DOI: 10.1080/01694243.2019.1701894

Information about the authors

Timur S. Sultanmagomedov, Cand. Sc., Associate Professor, Ufa State Petroleum Technological University, 1, Kosmonavtov street, Ufa, 450064, Russian Federation. sultanmaga@ya.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4969-2808>

Sultanmagomed M. Sultanmagomedov, Dr. Sc., RANS Academician, Professor, Dean of the Pipeline Transport Faculty, Ufa State Petroleum Technological University, 1, Kosmonavtov street, Ufa, 450064, Russian Federation. ftt2010@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6111-1319>

Khiramagomed Sh. Shamilov, Cand. Sc., Associate Professor, Ufa State Petroleum Technological University, 1, Kosmonavtov street, Ufa, 450064, Russian Federation. khiramagomed@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8190-6389>

Adeliia R. Urmanova, Assistant, Ufa State Petroleum Technological University, 1, Kosmonavtov street, Ufa, 450064, Russian Federation. urm.ar@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7521-6031>

Received: 02.10.2024

Revised: 15.10.2024

Accepted: 18.06.2025

УДК 553.3.072
DOI: 10.18799/24131830/2025/7/5053
Шифр специальности ВАК: 1.6.9
Обзорная статья

Золоторудное месторождение Сухой Лог (Патомское нагорье). Часть I. Постановка проблемы, геодинамическая обстановка и геологическое строение

В.В. Слоквенко✉, Ю.В. Колмаков

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск

✉Vvs120@tpu.ru

Аннотация. *Актуальность* настоящей работы, состоящей из трех частей, продиктована сохраняющейся по сей день неопределенностью в вопросе генезиса оруденения месторождения-гиганта Сухой Лог и его аналогов. Подавляющее большинство современных исследований посвящены петрологии, изотопной геохронологии и геохимии. Опубликованных источников, посвященных изучению геофизических полей месторождения, крайне мало, но и они преимущественно посвящены изучению полей регионального масштаба и глубинного строения земной коры. Дополнение уже имеющихся исследований, посвященных образованию сухоложского оруденения, анализом детальных геофизических полей позволит восполнить недостаток сведений в этой области. *Целью* работы в целом является анализ структуры геофизических и радиогеохимических полей месторождения и определение вероятной природы аномалий. *Целью* первой части работы является синтез наиболее актуальной на данный момент геологической, геофизической и геохронологической информации по месторождению и анализ существующих точек зрения на формирование оруденения. Реконструкция геодинамического развития региона в совокупности с данными по геолого-тектонической позиции месторождения способствуют корректному объяснению причин и последовательности появления геофизических аномалий. Поскольку данная статья является в большей степени обзорной, ее *методами* являются поиск, синтез и анализ результатов наиболее актуальных и комплексных исследований, посвященных геодинамике, геохронологии, петрологии и металлогении месторождения Сухой Лог и Бодайбинского золоторудного района. *Результаты и выводы.* Золотое оруденение Бодайбинского района формировалось в непростых геодинамических условиях. Происходила неоднократная смена геодинамических обстановок и тектонических режимов. Формирование месторождения происходило в несколько этапов, что подтверждается как геохронологическими исследованиями, так и корреляцией с геодинамическим развитием региона.

Ключевые слова: геодинамическая обстановка, золотое оруденение, Бодайбинский золоторудный район, формирование оруденения, черносланцевые формации, полихронные и полигенные месторождения

Для цитирования: Колмаков Ю.В., Слоквенко В.В. Золоторудное месторождение Сухой Лог (Патомское нагорье). Часть I. Постановка проблемы, геодинамическая обстановка и геологическое строение // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 7. – С. 156–173. DOI: 10.18799/24131830/2025/7/5053

UDC 553.3.072
DOI: 10.18799/24131830/2025/7/5053
Review article

Sukhoy Log gold ore deposit (Patom Highlands). Part I. Problem statement, geodynamic setting and geological structure

V.V. Slokvenko✉, Yu.V. Kolmakov

National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

✉Vvs120@tpu.ru

Abstract. Relevance. The uncertainty surrounding the genesis of mineralization of the Sukhoy Log giant deposit and its analogues, a question which remains unresolved. The majority of modern studies are devoted to petrology, isotope geochronology and geochemistry. However, only a paucity of published sources focuses on the study of geophysical fields of the deposit, and even these are chiefly concerned with regional-scale fields and the deep structure of the Earth's crust. The integration of detailed geophysical fields with existing studies on the formation of the Sukhoy Log mineralization will facilitate a more precise understanding of the prevailing uncertainties in this area. **Aim.** To analyse the structure of the geophysical and radiogeochronological fields of the deposit and to determine the likely nature of the anomalies. The first part of the work is dedicated to synthesising the most relevant geological, geophysical and geochronological information on the deposit, as well as analysing existing views on the formation of mineralisation. The reconstruction of the geodynamic development of the region, in conjunction with data on the geological and tectonic position of the deposit, contributes to a correct explanation of the causes and sequence of geophysical anomalies. Since this is a review article, its methods are searching for the most relevant and comprehensive studies on geodynamics, geochronology, petrology and metallogeny of the Sukhoy Log deposit and the Bodaibo gold bearing district; their synthesis and analysis. **Results and conclusions.** Gold mineralization of the Bodaibo gold bearing district was formed in difficult geodynamic conditions. There was a repeated change of geodynamic settings and tectonic regimes. The formation of the deposit occurred in several stages, which is confirmed both by geochronological studies and correlation with the geodynamic development of the region.

Keywords: geodynamic setting, gold mineralization, Bodaibo gold bearing district, ore formation, black shale formations, polychronous and polygenic deposits

For citation: Slokvenko V.O., Kolmakov Yu.V. Sukhoy Log gold ore deposit (Patom Highlands). Part I. Problem statement, geodynamic setting and geological structure. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 7, pp. 156–173. DOI: 10.18799/24131830/2025/7/5053

Введение

Генезис оруденения золоторудного месторождения Сухой Лог, расположенного в Бодайбинском прогибе Байкало-Патомской складчатой области, является предметом многолетних споров. Полноценного консенсуса по сей день достигнуто не было, и проблема по-прежнему стоит остро.

Оспариваются в основном два ключевых вопроса: источник рудных компонентов и относительная значимость процессов литогенеза, метаморфизма и магматизма на формирование оруденения.

По мнению одних исследователей [1–8], источником золота являются сами рудовмещающие осадочные толщи, сингенетично обогащенные в связи с вулканической активностью на уровне дна бассейна осадконакопления. Вопросы концентрирования золота, мышьяка и серы на этапе седиментогенеза подробно рассматривались в [9–15]. Вызывает множество споров роль органического вещества в процессе концентрирования золота на этапе седиментогенеза [16–18]. Золото первоначально могло находиться в виде металлоорганических соединений [19] или в виде тиоловых комплексов [20]. В работах [6, 7, 21] рассматривалась также роль органических соединений в транспортировке золота на последующих после седиментогенеза этапах литогенеза. Так, подвижные углеводороды были признаны потенциально важными агентами для накопления и переноса многих металлов, включая золото, в осадочных бассейнах.

Сторонники гипотезы сингенетичного обогащения в качестве ключевого этапа формирования оруденения выделяют региональный или динамотермальный метаморфизм [22–27]. Считается, что

рассеянное золото было экстрагировано метаморфогенными флюидами из вмещающих толщ и впоследствии переотложено в ходе регрессивного этапа метаморфизма. Данная концепция носит название метаморфогенно-гидротермальной. Этой концепцией подразумевается также и то, что любые гидротермальные изменения происходили изохимически – за счет исключительно внутренних ресурсов вмещающих пород [25]. В зарубежной литературе генетическую категорию месторождения и его аналогов определяют как орогенную, что основано, во-первых, на его приуроченности к складчатому поясу и, во-вторых, на непосредственном участии метаморфогенных флюидов, сопряженных с син- и постколлизийными процессами, в формировании оруденения [28–31].

Противоположная метаморфогенной гипотеза несет название магматогенно-гидротермальной. Данная концепция в значительной степени менее распространена и освещена в периодической литературе. Ключевым для формирования оруденения является процесс становления интрузий гранит-диорит-долеритового состава и сопряженный с ним метасоматизм [32–34]. Вопросы метасоматических преобразований на месторождении и его ближайших аналогах подробно рассмотрены в [17, 34, 35]. Метасоматиты, по представлениям авторов, соответствуют березитовому профилю, образованы в результате воздействия углекислотного флюида, осуществлявшего вынос оснований и привнос щелочных металлов. Метасоматизм мог происходить как в один этап, с привносом исключительно калия [35], так и в несколько этапов, когда сначала приносился натрий, а уже потом калий [17].

Возникает парадоксальная ситуация: как могут одновременно сосуществовать две столь противоречащие друг другу гипотезы, причем каждая из них имеет под собой научное обоснование? Подобный парадокс со временем привел к формированию комплексных гипотез, старающихся принять сложную и многоэтапную геологическую историю региона, смещая таким образом акцент с крайних точек зрения на формирование оруденения [36–43]. Данные концепции несут название метаморфогенно-метасоматических. Ключевым событием, согласно данным концепциям, является возникновение, причем неоднократное, единого для региона глубинного источника тепла и, вероятно, флюидов, с ним сопряженных, экстрагирующих и транспортирующих рудные компоненты из вмещающих пород [36, 38, 43]. Гидротермальные изменения, такие как, например, образование железомagneзиальных карбонатов, приурочены именно к регрессивному этапу динамотермального метаморфизма [39, 40]. Многоэтапность развития региона отражается и во множестве генераций пирита, от безрудных синседиментационного и диагенетического, до рудного метаморфогенного и пострудного метасоматического [4, 5, 37].

Несмотря на возросшее количество исследований, включающих петрологические, геохимические и геохронологические, соотношение процессов метаморфизма и метасоматизма в рудообразовании до сих пор остается предметом споров. Одним из способов приближения к решению возникшей проблемы является применение методов разведочной геофизики с целью уточнения относительного вклада различных геологических процессов в формирование оруденения.

Работ, ранее освещавших геофизические характеристики месторождения или сопряженных территорий, в периодической литературе крайне мало [33, 44]. Упомянутые работы, к тому же, в большей степени посвящены исследованию региональной геолого-геофизической обстановки и глубинного строения земной коры. Так, в работе [33] было установлено наличие залегающего на глубине криптобатолита – Угаханского плутона, и была выдвинута гипотеза о приуроченности месторождения к краевой его части. В работе [44] было установлено наличие мантийного выступа по Бодайбинским синклинорием, гипотетически являющимся источником глубинных флюидов. Ни одна из работ не была посвящена изучению детальных полей месторождения.

Геодинамическое развитие Байкало-Патомской складчатой области Архей

Отложения архейского возраста в Патомском нагорье практически не вскрываются и изучены слабо. В связи с этим детальная геологическая ре-

конструкция развития региона в архейское время затруднена. В общих чертах стоит отметить, что в архейское время было сформировано континентальное основание региона – фундамент Сибирской платформы [45]. В течение раннепротерозойского тектономагматического цикла архейское основание было переработано, и был сформирован фундамент складчатой области, который вскрывается в блоках Чуйско-Нечерского антиклинория. Он состоит преимущественно из образований раннепротерозойского возраста с включениями регрессивно-метаморфизованных архейских реликтов. Конец архей–начало раннего протерозоя отмечается стабилизацией тектонического режима. Об этом свидетельствуют залегающие в основании раннепротерозойского разреза кварциты илинакской свиты, представляющие собой метаморфизованные продукты кор выветривания, переотложенных в прибрежно-морских условиях.

Ранний протерозой

За позднеархейской тектонической стабилизацией последовало заложение пассивной континентальной окраины, на длительный период предопределившей особенности режима осадконакопления в регионе. Раннепротерозойский осадочный комплекс включает в себя флишеидные отложения албазинской, михайловской и ходоканской свит. Область осадконакопления контролировалась Алеканомалотуюканским и Жуинским разломами (рис. 1). Корреляция свит раннего протерозоя затруднена, они ограниченно вскрываются в пределах выступов фундамента в Чуйско-Нечерском антиклинории. Несмотря на неоднозначность корреляции раннепротерозойского разреза, по общим представлениям кварциты илинакской свиты накапливались в прибрежно-морских условиях, а флишеидные породы – в условиях континентального склона. Наиболее вероятной интерпретацией подобных различий в составе отложений является фациальная зональность в пределах единой континентальной окраины: фации менялись от шельфа в Патомской области до континентального склона в Бодайбинской. Завершение раннепротерозойского осадконакопления было ознаменовано грабенообразованием, предположительно связанным с рифтингом. Грабены наполнялись вулканогенно-осадочными породами туюканской свиты. Впоследствии они были прорваны и метаморфизованы гранитоидами чуйско-кодарского (чуйско-нечерского) комплекса возрастом 1900 ± 50 млн лет, являющимися протоорогенными образованиями [46]. Весь раннепротерозойский цикл в целом был завершен тектономагматической активизацией с внедрением базитов туюканского комплекса и гранитоидов амандракского (ничатского) комплекса на рубеже 1700 ± 50 млн лет, что также привело и к

гидротермально-метасоматической переработке ранее сформированных пород. Дайки диабазов группируются в отчетливые пояса и фиксируют раннепротерозойские корово-мантийные глубинные разломы [46]. После тектономагматической активизации наступил этап тектонической стабилизации, сопровождающийся корообразованием вплоть до рифея.

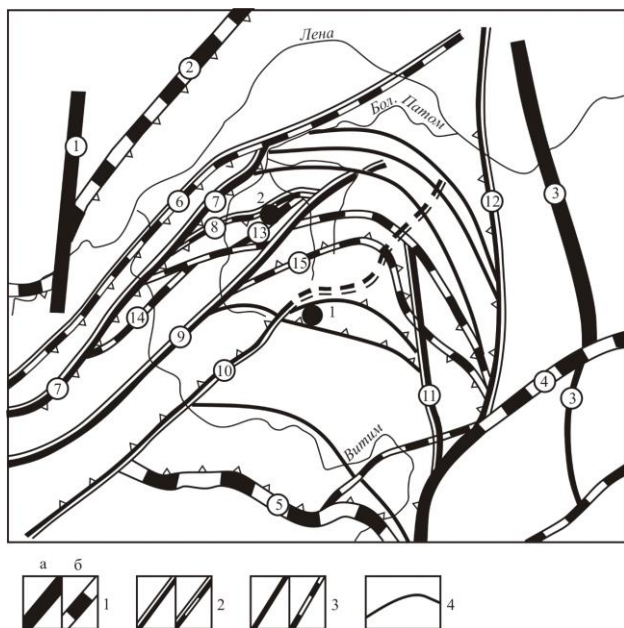


Рис. 1. Схема главных разломов фундамента окраинно-континентальной мегазоны [45, 46]: 1–3 – разломы палео- (а) и мезопротерозойского (б) заложения с активизацией во все последующие тектономагматические этапы: между крупными литосферными блоками (1); внутриблоковые конседиментационные (2) и прочие (3); 4 – разломы эпохи линейного складкообразования раннего-среднего палеозоя. Номера разломов: 1 – Восточно-Ньюйский; 2 – Ленско-Ньюйский; 3 – Чарский; 4 – Ничатский; 5 – Правомамаканский; 6 – Ажиткано-Джербинский; 7 – Алеканомалотуюканский; 8 – Тонодский; 9 – Чуйский; 10 – Абчадский; 11 – Нечерский; 12 – Жуинский; 13 – Хайвергино-Кевактинский; 14 – Язовский; 15 – Чуйско-Нечерский

Fig. 1. Scheme of the main basement faults of the marginal continental megazone [45, 46]: 1–3 – Paleozoic (a) and Mesoproterozoic (b) faults with activation in all subsequent tectonomagmatic stages: between large lithospheric blocks (1); intra-block consedimentary (2) and other (3); 4 – faults of the Early-Middle Paleozoic linear folding. Faults: 1 – Eastern-Nyu; 2 – Lensko-Nyu; 3 – Charsky; 4 – Nichatsky; 5 – Pravomamakansky; 6 – Akitkano-Jerbinsky; 7 – Alekano-Malotuyukansky; 8 – Tonodsky; 9 – Chuysky; 10 – Abchadsky; 11 – Nechersky; 12 – Zhuinsky; 13 – Khaivergino-Kevaktinsky; 14 – Yazovsky; 15 – Chuisko-Nechersky

Ранний рифей

К раннерифейским отложениям Байкало-Патомской складчатой области относят тепторгинскую серию, включающую в себя пурпольскую и медвежевскую свиты. Согласно [1], в рифейский этап выделяются две мегазоны: внешняя палеошельфовая Байкало-Патомская и внутренняя Байкало- и Баргузино-Витимская.

Начало рифейского этапа формирования патомского нагорья знаменуется пурпольским временем. В это время во внешней зоне формировались осадки каолинит-кварцевого типа при переотложении раннепротерозойских кор выветривания в условиях плавного прогибания пассивной континентальной окраины [1, 2]. Считается, что именно в пурпольское время был заложен шельфовый морской бассейн [45]. Осадконакопление также контролировалось двумя разломами – с востока и юго-востока по-прежнему Жуинским, с запада и северо-запада уже Ажиткано-Джербинским [45].

Пурпольские отложения хорошо изучены в пределах Чуйско-Нечерского антиклинория, в Тонодском и Нечерском выступях фундамента. В целом пурпольским отложениям свойственны одни и те же фациальные признаки: по мере удаления от разломов фундамента увеличивается степень грубозернистости отложений свиты и появляются косо-слоистые текстуры. Поскольку указанные фациальные особенности проявлены по всему разрезу свиты, считается, что береговая линия имела в пурпольское время стабильное положение.

Медвежевское время характеризуется как начальнорифтогенный этап развития региона и сопряжено с разрушением раннепротерозойского основания и заложением Олокит-Бодайбинского рифта (рис. 2). Считается, что этот этап служит продолжением Уджинского-Витимского рифта [47]. Олоkitская зона в современном виде представляет собой сильно сжатый рифейский рифтогенный трог, сложенный вулканогенно-терригенными толщами со стратиформным медно-цинковым колчеданным оруденением, продолжающийся в северо-восточном направлении под осевую часть Бодайбинского прогиба [47].

В три этапа была сформирована система грабенов, разделенных между собой горстами, поставляющими в грабены грубообломочный материал [45]. Грабены первых двух этапов имели субмеридиональную ориентировку, а третьего этапа – северо-восточную. В них формировалась непосредственно медвежевская свита – преимущественно конгломератовая, с повышенным содержанием железа, в некоторых участках в ее строении участвуют вулканогенные образования, по [48] представленные субаквальными эффузивами основного состава. Рифтогенез сопровождался внедрением интрузий перидотит-базальтового состава [1]. Накопление свиты осу-

ществлялось в условиях обширного континентального морского бассейна, береговые линии контролировались аналогично пурпольскому времени Актано-Джербинским и Жуинским разломами.

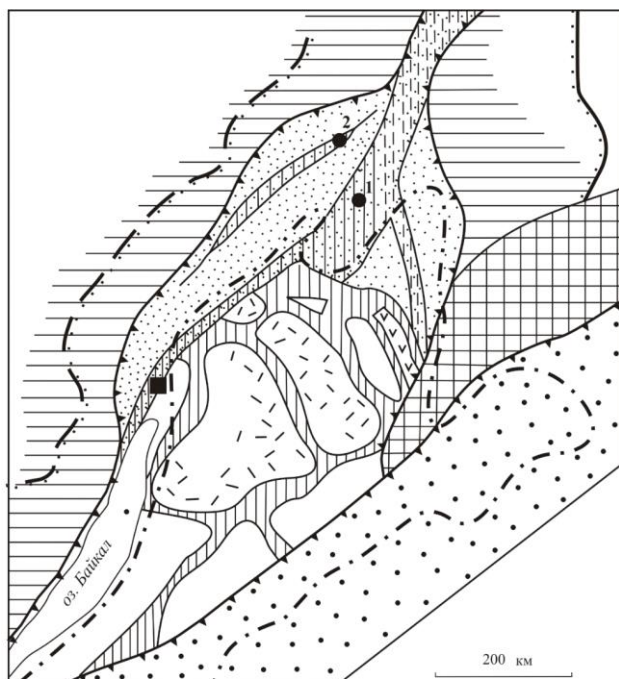


Рис. 2. Схема расположения палеорифтов в структуре Байкало-Патомской складчатой области [1, 46]: 1 – рифейский эпикратонный прогиб; 2 – Олоkit-Бодайбино-Вилу́йский палеорифт; 3 – палеорифты с андезит-базальтовым вулканизмом (а) и базит-ультрабазитовым магматизмом (б); 4 – реликтовые блоки фундаментов микроконтинентов с вулканидами андезит-дацит-плагиоориолитового (а) и основного (б) состава; 5 – граница Ангаро-Витимского ареал-плутона

Fig. 2. Location scheme of palaeorifts in the structure of the Baikal-Patom fold belt [1, 46]: 1 – Riphean epicratonic trough; 2 – Olokit-Bodaibo-Vilyuy paleorift; 3 – paleorifts with andesite-basalt volcanism (a) and basic-ultrabasic magmatism (b); 4 – relict blocks of microcontinent basement with andesite-dacite-plagioclite (a) and basic (b) volcanites; 5 – boundary of the Angaro-Vitim areal-pluton

Рифтогенное грабенообразование было проявлено в северной и частично в северо-западной частях морского бассейна. Области грабенообразования и не затронутые участки разделялись разломами, параллельными тем, что контролируют береговые линии морского бассейна. Аномально высокое содержание железа, проявленного в виде железистых кварцитов и хлорита, связывается по [2] с подводной вулканической деятельностью, сопутствующей

рифтогенным процессам: железо поступало в бассейн осадконакопления в растворе или в виде коллоидных соединений оксидов и гидроксидов.

Завершается рифтогенный этап магматической активизацией с внедрением основных, средних и кислых интрузий: в зонах пересечений магмоподводящих разломов земной коры формировались дайки и силлоподобные интрузии базитов чайского комплекса. Возраст метасоматических изменений пород медвежьей свиты составляет 1300 млн лет (Rb-Sr метод, [45]). Считается, именно в это время завершились активные магматические процессы в рифтингах во внешней палеошельфовой зоне [1]. На основании этих данных также обосновывается и возраст тепторгинской серии: нижняя ее возрастная граница обоснована несогласным залеганием пурпольской свиты на фундаменте платформы, а верхняя – по датировке метасоматических процессов.

Средний рифей

В среднем рифее Байкало-Патомская область развивается по типу пассивной континентальной окраины с контролирующими ее Ленско-Ньюйским сбросом и Чарским сбросо-сдвигом, которые осложнялись трансформноподобными разломами [45]. В качестве конседиментационной структуры развивается Жуинский разлом. Отложения среднего рифея наследуют зональность, свойственную пурпольскому времени: от шельфовой обстановки во внешней зоне до обстановки континентального склона во внутренней, положение береговой линии существенно не изменялось. Существовала отчетливая тенденция к стабилизации тектонического режима, что выразилось в увеличении со временем доли осадков карбонатного состава.

В первой половине среднего рифея в Байкало-Патомской зоне осуществлялось накопление отложений балаганхской серии, включающей в себя хорлухатскую, хайвергинскую, бугарихтинскую и бодайбокскую свиты. Во второй половине накапливалась часть дальнетайгинской серии, включая бужуихтинскую и угоханскую свиты. Осадконакопление осуществлялось в спокойной геодинамической обстановке. Отложения балаганхской серии и нижних свит дальнетайгинской серии характеризуются литофильной специализацией, содержание редких элементов близко к кларковым. Хотя отмечается наличие ореолов сидерохалькофильной специализации над троговыми структурами, особенно над участками медвежьего основного магматизма, что может свидетельствовать о гидротермальной деятельности в первой половине среднего рифея [48]. Впрочем, большинством исследователей полагается полное отсутствие эндогенных процессов во всей окраинноконтинентальной системе в течение среднего рифея [1, 2, 45].

Балаганахские отложения в основном представлены низкозрелыми, слабодифференцированными аркозовыми, поли- и олигомиктовыми песчаниками, с незначительными прослоями углистых сланцев. Бужуихтинская и угоханская свиты представлены полевошпат-кварцевыми песчаниками с незначительными прослоями филлитовых сланцев и мелкозернистыми биохомогенными известняками.

Байкало-Витимскую и Байкало-Патомскую мегазоны можно рассматривать как единую геодинамическую окраинноконтинентальную систему [1]. Г.Л. Митрофановым была выявлена синхронность накопления известково-щелочной «островодужной» плагиоориолит-базальтовой и кремнисто-вулканогенной формаций внутренней зоны и балаганахской серии внешней зоны. Единство системы также косвенно подтверждается возрастом доли пород карбонатного состава вверх по разрезу среднего рифея в обеих зонах.

Поздний рифей

Позднерифейский этап является завершающим в становлении континентально-окраинного бассейна осадконакопления. Развитие региона в течение позднего рифея происходило в обстановке растяжения. Согласно [1], в конце среднего рифея произошло заложение рифтингов в Байкало-Витимской зоне с образованием океанической коры. Несомненно, столь значительное геодинамическое событие не проявилось локально лишь в Байкало-Витимской зоне и затронуло всю окраинноконтинентальную систему. На фоне интенсивного рифтинового магматизма произошла активизация Олоkit-Бодайбинского палеорифта, развитого в основании эпикратонного прогиба. Индикаторами тектономагматической активизации являются метабазаиты нюрндканской толщи (1035 ± 97 млн лет, [1]) во внутренней зоне и лерцолиты доросского комплекса во внешней зоне (1055 ± 69 млн лет, [45]). Благодаря активизации рифтингов, во внешней зоне произошло усиление прогибания перикратонной области, что выразилось в трансгрессии моря вглубь континента. Согласно [45], на этапе накопления хомолхинской свиты, Сибирская платформа была практически полностью покрыта морем, осадконакопление происходило в условиях, аналогичных среднерифейскому времени.

К породам позднего рифея относят хомолхинскую и имняхскую свиты дальнотайгинской серии и ранние отложения жуинской серии в составе аунakitской и частично вачской свит.

Время накопления хомолхинской свиты палеошельфовой зоны и ее аналогов соответствует времени раскрытия рифтингов внутренней зоны Байкало-Патомской складчатой области на фоне подновления Олоkit-Бодайбинского палеорифта.

Основным доводом в пользу общей активизации древнего рифта в основании прогиба в начале позднего рифея, помимо описанных выше интрузивных комплексов, являются повсеместно фиксируемые результаты гидротермальной деятельности, которая привела к формированию осадков с различной металлогенической специализацией, накапливавшихся в условиях спрединга дна морского бассейна [1–3, 45, 46, 48]. Формирование металлогенически специализированных осадков, обусловленных циркуляцией гидротерм по активным разломам фундамента в условиях спрединга дна, описывается гипотезой, вкратце приведенной в [46]. Морские воды, проникая по активным разломам фундамента в нижние горизонты земной коры и нагреваясь по мере углубления, вступают в реакцию с породами, содержащими рудные компоненты. В результате формировались насыщенные гидротермальные растворы, транспортирующие эти компоненты к поверхности дна бассейна. Наиболее крупными активными позднерифейскими разломами являлись Ленско-Нюйский, Чарский, Аkitкано-Джербинский, Жуинский, Чуйский и Абчадский, контролировавшие в том числе зоны резких фациальных переходов [2].

Геохимическими данными подтверждается, что в составе верхнерифейских отложений выделяется терригенный материал, сносимый с Сибирского кратона, а также вулканогенный материал, поступающий в связи с вулканизмом спрединга дна бассейна осадконакопления [48]. Геохимические особенности, подобные отложениям хомолхинского времени, свойственны и свитам жуинской серии, что гласит о функционировании рифтовых систем на протяжении всего позднего рифея [48].

Таким образом, основным признаком позднерифейских отложений является переход от литофильной к сидерохалькофильной специализации осадков. В данной работе полагается, что две нижние свиты дальнотайгинского горизонта, бужуихтинская и угоханская, накапливались в среднем рифее ввиду их литофильной специализации и отсутствия признаков вулканической и гидротермальной деятельности, свойственных для верхнерифейских отложений. Время начала накопления осадков хомолхинской свиты, соответственно, составляет порядка 1000 млн лет, при этом, в соответствии с исследованием [49], полагается длительный период их накопления, вплоть до 300 млн лет.

Позднерифейский рифтогенез являлся ключевым фактором формирования многих месторождений Байкало-Патомской складчатой области. Так, в Мамско-Бодайбинской зоне осуществлялось накопление углеродистых толщ с повышенным содержанием золота и ЭПГ, которые вмещают большинство известных там благороднометалль-

ных месторождений (рис. 3). В Олоkitской зоне была проявлена свинцово-цинковая первично-осадочная минерализация с изотопным возрастом 740–760 млн лет [46]. Ярким примером месторождения с подобным типом оруденения является Холоднинское полиметаллическое месторождение [47, 50].

Одновременно с накоплением на уровне чехла специализированных углеродистых осадочных толщ на уровне фундамента в интенсивно тектонизированных зонах формировались металлоносные метасоматиты [46]. Об этом гласят изотопные датировки руд месторождений, развитых в отложениях нижнепротерозойского фундамента как в Байкало-Муйской зоне, так и в Чуйско-Нечерском антиклинории.

Так, в Байкало-Муйской зоне на Ирокиндинском месторождении фиксируется этап развития на

рубеже 950–700 млн лет, а на Каралонском, Уряхском и Чипчиконском – 1000, 900–700 млн лет [46]. В Тонодском поднятии в качестве примера можно привести месторождение Чертово Корыто с модельным возрастом свинца 1050–700 млн лет [46]. Месторождение контролируется глубинным разломом фундамента, вблизи которого произошло рифейское омоложение гранитов Амандракского комплекса, что также говорит о влиянии гидротерм на данном этапе развития региона.

Заложение системы рифтов в Байкало-Муйской зоне с последующим спредингом дна бассейна являлось начальным этапом цикла Вильсона и привело к образованию океанической коры (рис. 4) [51]. На этом этапе формировался молодой океан. В дальнейшем, на рубеже 950–90 млн лет, начинаются процессы субдукции океанической плиты под окраину Сибирского кратона [52].

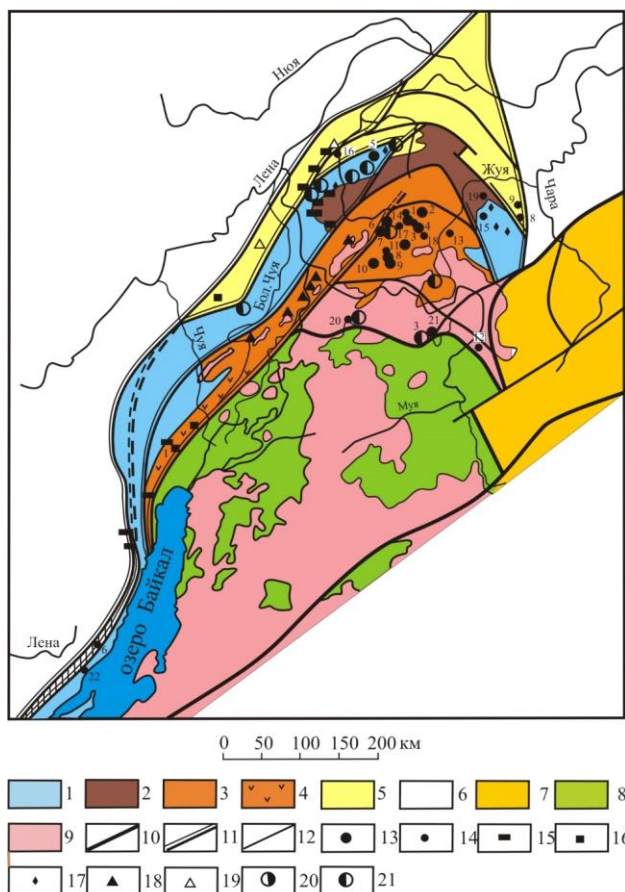


Fig. 3. Scheme of ore deposits location in the marginal continental megazone [2, 46]: 1, 2 – protrusions of Early Precambrian basement (1) and zones of basement overlapping with Meso- and Neoproterozoic sediments (2); 3, 4 – Mama-Bodaibo (3) and Olokit (4) structural-facial zones of Mama-Bodaibo block; 5 – Baikal-Patom block; 6 – Siberian Platform cover; 7 – Early Precambrian formations of the Aldan Shield; 8 – Baikal-Muya megazone formations; 9 – Paleozoic granitoids; 10–12 – interblock (10), intra-block (11) and considerable (12) faults; 13 – gold deposits: Sukhoy Log (1), Vyschayeshee (2), Verninskoe (3), Nevskoe (4), Chertovo Koryto (5), Ozherye (6), Ykanskoe (7), Kopylovskoe (8), Kavkaz (9), Dogaldynskaya vein (10), 14 – gold ore occurrences: Krasnoe (11), Uryakhsкое (12), Svetlovskoe (13), Verkhne-Ugokhanskoe (14), Khodokanskoe (15), Goltsovoe (16), Rovninskoe (17), Atyrkanskoe (18), Balaganakhskoe (19), Dodykhtinskoe (20), Chayandinskoe (21); 15–21 – deposits and ore occurrences: ferruginous quartzites (15), lead-zinc (16), uranium (17), muscovite (18), magnesite (19), tin (20), tungsten (21)

Рис. 3. Схема расположения рудных месторождений в окраинно-континентальной мегазоне [2, 46]: 1, 2 – выступы раннедокембрийского фундамента (1) и зоны перекрытия фундамента отложениями мезо-, неопротерозоя (2); 3, 4 – Мамско-Бодайбинская (3) и Олоkitская (4) структурно-фациальные зоны Мамско-Бодайбинского блока; 5 – Байкало-Патомский блок; 6 – чехол Сибирской платформы; 7 – раннедокембрийские образования Алданского щита; 8 – образования Байкало-Муйской мегазоны; 9 – палеозойские гранитоиды; 10–12 – разломы межблоковые (10), внутриблоковые (11) и консолидационные (12); 13 – месторождения золота: Сухой Лог (1), Высочайшее (2), Вернинское (3), Невское (4), Чертово Корыто (5), Ожерелье (6), Ыканское (7), Копыловское (8), Кавказ (9), Догалдынская жила (10); 14 – рудопоявления золота: Красное (11), Уряхское (12), Светловское (13), Верхне-Угоханское (14), Ходоканское (15), Гольцовое (16), Ровнинское (17), Атырканское (18), Балаганакское (19), Додыхтинское (20), Чаяндринское (21); 15–21 – месторождения и рудопоявления: железистых кварцитов (15), свинцово-цинковые (16), урана (17), мусковита (18), магнезита (19), олова (20), вольфрама (21)

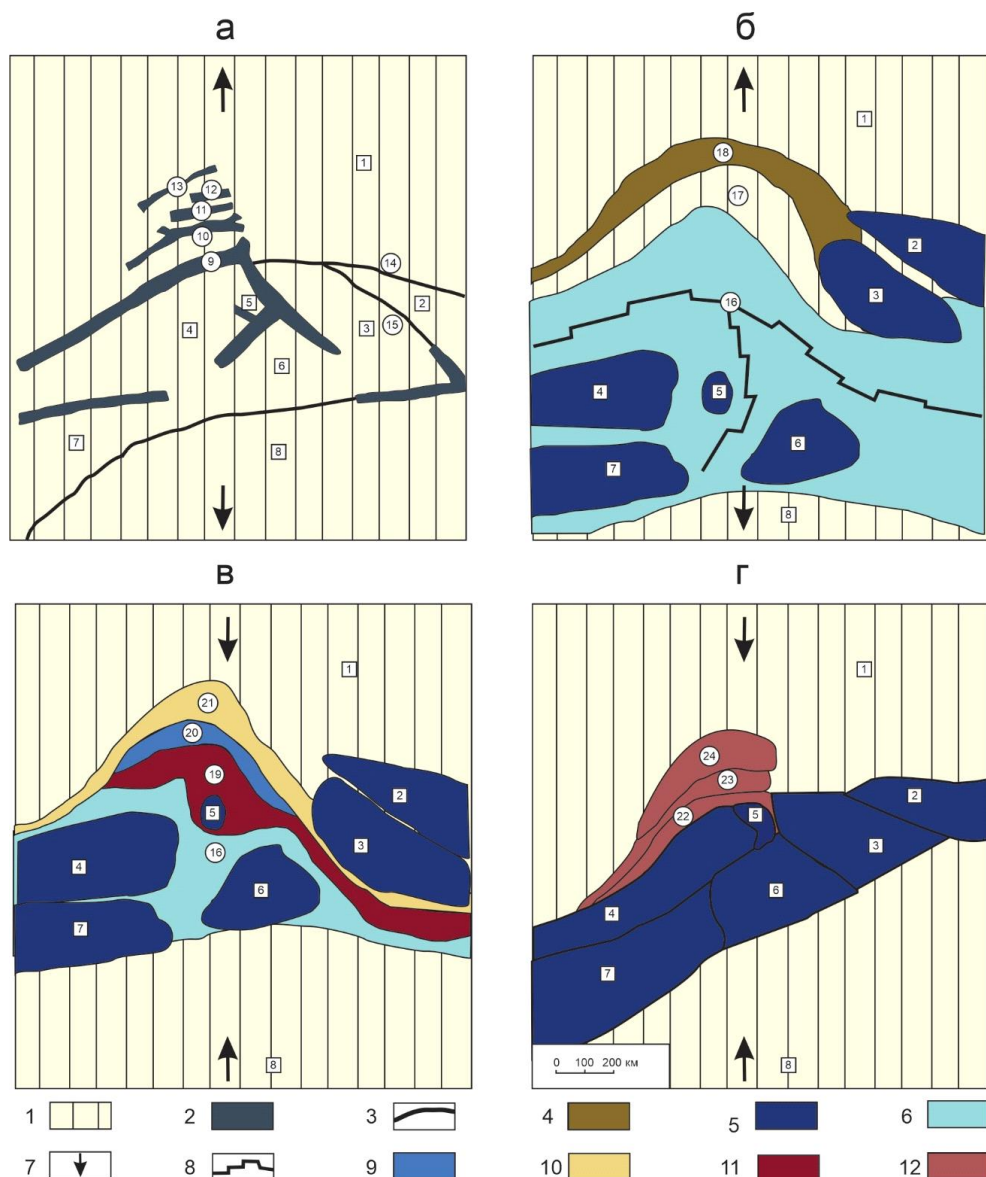


Рис. 4. Палеогеодинамические схемы этапов развития Байкало-Витимского пояса в протерозое: а) континентального рифтогенеза, б) молодого океана, в) зрелого океана, г) континентальной коллизии [51]: 1 – континенты; 2 – континентальные рифты; 3 – разломы; 4 – шельф пассивной окраины континента; 5 – микроконтиненты; 6 – океанический бассейн; 7 – направление движения литосферных плит; 8 – срединно-океанический хребет; 9 – глубоководная котловина; 10 – шельф; 11 – система островных дуг; 12 – коллизионные зоны. Цифры в квадратах – континенты и микроконтиненты, блоки: 1 – Сибирский, 2 – Становой, 3 – Каларо-Могочинский, 4 – Баргузино-Витимский, 5 – Муйский, 6 – Читинский, 7 – Хилокский, 8 – Тувино-Монгольский; цифры в кругах: 9–15 – континентальные рифты и разломы: 9 – Байкало-Витимский, 10 – Южно-Бодайбинский, 11 – Маракано-Тунгусский, 12 – Хомолхинский, 13 – Язовско-Саталахский, 14 – Становой, 15 – Джелтулакский; 16 – Байкало-Витимский океанический бассейн; 17, 18 – шельфы пассивной окраины континента: 17 – Бодайбинско-Удоканский, 18 – Чуйско-Угуйский; 19 – вулканические островные дуги; 20 – Делюн-Уранский задуговой бассейн; 21 – Бодайбинский шельф окраинного моря; 22–24 – коллизионные зоны: 22 – Байкало-Витимская, 23 – Мамско-Бодайбинская, 24 – Чуйско-Нечерская

Fig. 4. Paleogeodynamic schemes of the stages of the Baikal-Vitim fold belt development in the Proterozoic: а) continental riftogenesis, б) young ocean, в) mature ocean, г) continental collision [51]: 1 – continents; 2 – continental rifts; 3 – faults; 4 – shelf of passive continental margin; 5 – microcontinents; 6 – ocean basin; 7 – direction of lithospheric plates movement; 8 – mid-ocean ridge; 9 – deep-water basin; 10 – shelf; 11 – system of island arcs; 12 – collision zones. Figures in squares – continents and microcontinents, blocks: 1 – Siberian, 2 – Stanovoy, 3 – Kalaro-Mogocha, 4 – Barguzino-Vitim, 5 – Muya, 6 – Chita, 7 – Khilok, 8 – Tuva-Mongolian; figures in circles: 9–15 – continental rifts and faults: 9 – Baikal-Vitim, 10 – South-Bodaibo, 11 – Marakano-Tungusky, 12 – Khomolkho, 13 – Yazovsko-Satalakh, 14 – Stanovoy, 15 – Jeltulak, 16 – Baikal-Vitim ocean basin; 17, 18 – shelves of the passive continental margin: 17 – Bodaybo-Udoka, 18 – Chuya-Uguysk; 19 – volcanic island arcs; 20 – Delun-Uranian beyond arc basin, 21 – Bodaybo marginal sea shelf, 22–24 – collision zones: 22 – Baikal-Vitim, 23 – Mama-Bodaibo, 24 – Chuya-Nechera

Молодой океан переходит в стадию зрелого, достигая максимальной глубины. Образуется система островных дуг и отколотых от Сибирского кратона микроконтинентов. Бассейн из шельфового постепенно переходит в задуговой, несущий название Делюн-Уранского задугового бассейна, спрединг дна бассейна продолжается.

На рубеже 740 млн лет происходит аккреция островных дуг к Сибирскому кратону, что приводит к кратковременной смене тектонического режима. На уровне фундамента в связи со сменой тектонического режима происходило формирование взбросо-сдвиговых деформаций, фиксируемых гранитоидами Язовского комплекса с возрастом 740 ± 20 млн лет [45]. К этому времени на уровне чехла отложения хомолхинской свиты, перекрытые карбонатными отложениями имнянской свиты, испытывали процессы катагенеза, а также складчатые деформации 1 этапа, выраженные в субгоризонтальных смещениях вдоль границ пластов [47].

Венд-ранний палеозой

К вендским образованиям Байкало-Патомской складчатой области относят поздние отложения жуинского горизонта, включающие в себя вачскую, анангскую и догалдынскую свиты, а также илигирскую свиту юдомского горизонта.

Дальнейшее развитие региона в венде было обусловлено завершением цикла Вильсона и переходом к коллизионной обстановке. Сибирский кратон с уже аккретивировавшей к нему системой островных дуг испытывал столкновения с рядом отколотых ранее микроконтинентов [51]. Окраинно-континентальный режим развития региона завершился, задуговый бассейн перешел к бассейну форланда, ограниченному орогеном с юга. Считается, что формирование орогена было завершено в анангское время. Полностью сформированный ороген стал новым поставщиком терригенного материала, при этом слагались грубообломочные полимиктовые молассовые толщи анангской и догалдынской свит. На этом этапе перекрытой оказалась и аунакитская свита – следующий после хомолхинской свиты геохимически специализированный горизонт, что способствовало катагенетическим преобразованиям его отложений.

На поздних этапах аккреции и коллизии микроконтинентов с окраиной Сибирского кратона рифей-вендские отложения испытали региональный метаморфизм и главную фазу линейного складкообразования.

В результате проявления главного этапа складчатости Байкало-Патомская область была разделена на структурные формы первого порядка. К ним относятся Мамско-Бодайбинский и Байкало-Патомский синклиналии, разделенные Чуйско-Нечерским антиклинорием (рис. 5).

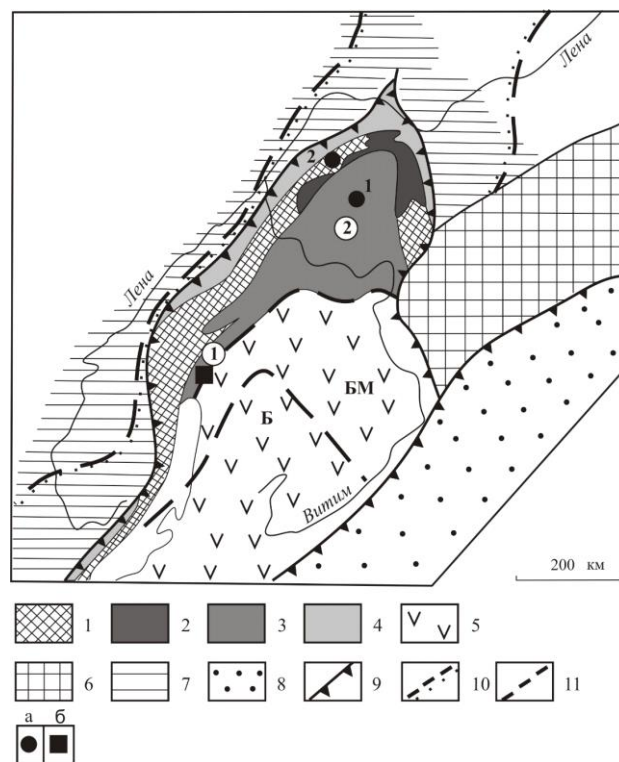


Рис. 5. Современная тектоническая схема Байкало-Патомской складчатой области [1, 46]: 1–4 – структуры окраинно-континентальной мегазоны: выступы раннедокембрийского фундамента (1) и зоны перекрытия фундамента отложениями рифея (2) в Чуйско-Нечерском антиклинории; Мамско-Бодайбинский блок (3); Байкало-Патомский блок (4); 5 – Байкало-Муйская мегазона (БМ) и Баргузинский докембрийский террейн (Б); 6 – раннедокембрийские образования Алданского щита; 7 – чехол Сибирской платформы; 8 – становая складчатая область; 9–11 – границы: складчатых областей (9), рифейской трансгрессии (10), мегазон (11); 12 – месторождения: золоторудные (а) – Сухой Лог (1) и Чертово Корыто (2); Холоднинское свинцово-цинковое (б). Цифры в кружках: 1 – Олоkitская и 2 – Мамско-Бодайбинская структурно-фациальные зоны Мамско-Бодайбинского блока

Fig. 5. Modern tectonic scheme of the Baikal-Patom fold belt [1, 46]: 1–4 – structures of the marginal continental megazone: Early Precambrian basement ledges (1) and zones of basement overlap with Riphean sediments (2) in the Chuya-Nechera anticlinorium; Mama-Bodaibo block (3); Baikal-Patom block (4); 5 – Baikal-Muysk megazone (BM) and Barguzin Precambrian terrane (B); 6 – Early Precambrian formations of the Aldan Shield; 7 – Siberian Platform cover; 8 – Stanovoy fold belt; 9–11 – boundaries of: folded regions (9), Riphean transgression (10), megazones (11); 12 – deposits: gold deposits (a) – Sukhoy Log (1) and Chertovo Koryto (2); Kholodninskoe lead-zinc deposit (b). Figures in circles: 1 – Olokit and 2 – Mama-Bodaibo structural-facial zones of the Mama-Bodaibo block

По структурам второго порядка развиты зоны смятия, для которых характерны интенсивная складчатость более высоких порядков, плейчатость, надвиги. Складчатость высоких порядков главного этапа относится к числу рудоконтролирующих факторов [17, 35, 36]. Наиболее ярко структурный контроль проявлен на месторождениях Кропоткинского рудного узла. В частности, Сухоложской антиклиналью – пликативной структурой третьего порядка, контролируется одноименное с ней месторождение.

С главной фазой складчатости связан региональный метаморфизм, проявленный на большей части Бодайбинского рудного района в зеленосланцевой фации [47]. Возраст метаморфизма исследователями оценивается по-разному. И.К. Рундквист оценивает возраст регионально-метаморфических преобразований в 520–570 млн лет [47]. В работе [53] приводится возраст метаморфизма рифейских толщ в диапазоне от 510 до 570 млн лет. Заметим, что большинство исследователей оценивает возраст пика метаморфических преобразований рифейских осадочных пород как середину венда. В работах [35, 54] катагенез отложений хомолхинской свиты датируется возрастом 630 млн лет, а их региональный метаморфизм – 570 млн лет.

Средний-поздний палеозой

Дальнейшее развитие региона в металлогеническом аспекте происходило в условиях активизации Забайкальского плюма [46]. Г.Л. Митрофанов считает, что в каледонский этап тектономагматической активизации плюм проявился дважды [1].

В первый раз палеозойский плюм был проявлен в Прибайкалье, в пределах Байкало-Витимской и Баргузино-Витимской зон, на границе верхнего кембрия и ордовика, существенно не затронув Бодайбинский прогиб. Возрастными индикаторами считаются внедренные вдоль Приморского разлома интрузии габбро-диорит-гранитовой серии (возрастом 535 ± 25 млн лет) и интенсивный метаморфизм с возрастом 520–530 млн лет. При этом в этих зонах формировались крупные сводовые поднятия. Второй раз плюм был проявлен в области сводового поднятия между Джида-Витимским и Абчадским глубинными разломами внедрением интрузий габбро-сиенитовой, габброидной или щелочной формации [1]. Возрастным индикатором выступают нефелиносодержащие габброидные интрузии итакитского комплекса, имеющие возраст 450–460 млн лет. В работе [55] возраст становления интрузий сынырского комплекса в бортах рифтовых систем, свидетельствующих о проявлении Ангаро-Витимского плутона, соответствует интервалу 300–285 млн лет, то есть сопоставляется с герцинским этапом ТМА [56].

В Бодайбинском районе в ареале воздействия плюма проявился магнезиально-железистый и углеродистый метасоматизм регионального характера [1]. Еще два этапа формирования золотого оруденения, связанные с гидротермально-метасоматическими процессами, датируются 447 ± 6 и 321 ± 14 млн лет [37, 38, 57].

Геолого-тектоническая обстановка и характеристика месторождения Сухой Лог

Месторождение Сухой Лог входит в состав Кропоткинского рудного узла Бодайбинского (ранее Ленского) золоторудного района (рис. 6). Бодайбинский район в геотектоническом отношении приурочен к структуре первого порядка – Бодайбинскому синклинию в составе Байкало-Патомской складчатой области. Структуры второго порядка синклиния контролируют локализацию рудных узлов. Так, Кропоткинский рудный узел, включающий месторождение Сухой Лог, контролируется Маракано-Тунгусской синклиналью.

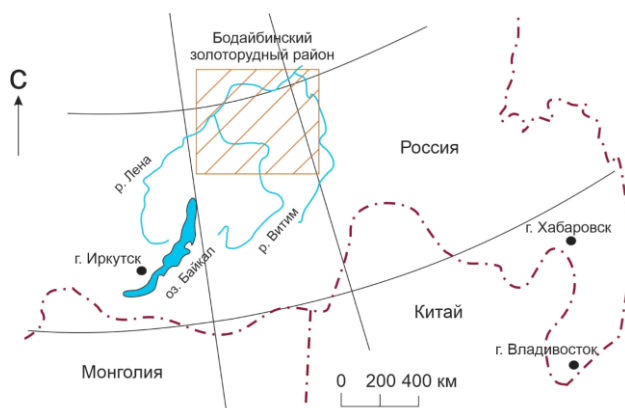


Рис. 6. Географическое положение Бодайбинского золоторудного района [58]

Fig. 6. Geographical location of the Bodaibo gold bearing district [58]

Стратиграфические подразделения на территории месторождения представлены имняхской и хомолхинской свитами дальнетайгинской серии и аунакитской свитой жуинской серии (рис. 7). Рудовмещающей является хомолхинская свита, перекрывающей – имняхская, отложения аунакитской свиты распространены незначительно. Имняхская свита разделена на две подсвиты: нижняя (im1) и верхняя (im2). Im1 представлена карбонатно-терригенными породами, im2 – карбонатами с тонкими прослоями сланцев. Хомолхинская свита разделена на три подсвиты: верхняя (hm3), к которой приурочено оруденение, средняя (hm2) и нижняя (hm1). Hm3 и hm1 представлены от темно-серых до черных тонкослоистыми металавролитами и угле-

родистыми сланцами. Их слоистая текстура представлена чередованием очень тонких слоев алевролитов и сланцев с дисперсными включениями темного ила [45]. Нм2 представлена серыми известняками с прослоями алевролитов и является подстилающей. Нм3 дополнительно подразделяется на пять пачек (рис. 8). На территории месторождения распространены отложения только нижней подсвиты аунакитской свиты (ау1), представленной чередованием тонких слоев серых кварцевых песчаников, углеродистых алевролитов и сланцев.

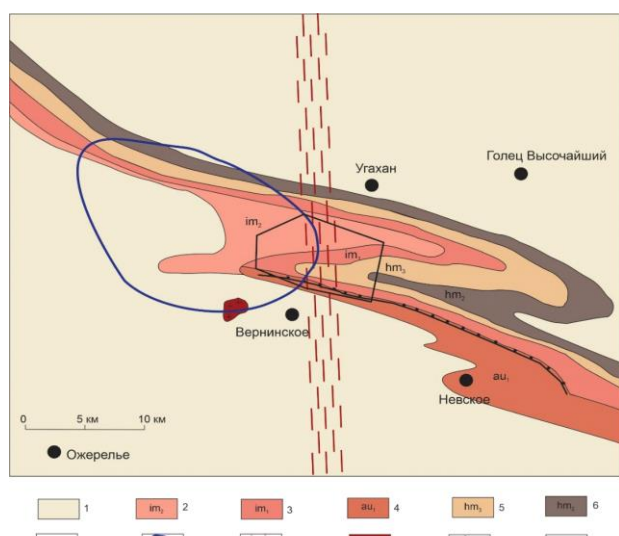


Рис. 7. Геолого-тектоническая схема Кропоткинского рудного узла: 1 – Рифей – вендские отложения, нерасчлененные; 2–6 – отложения в составе Маракано-Тунгусской синклинали, составляющие месторождение Сухой Лог: 2 – имняхская свита, верхняя подсвита; 3 – имняхская свита, нижняя подсвита; 4 – аунакитская свита, нижняя подсвита; 5 – хомолхинская свита, верхняя подсвита; 6 – хомолхинская свита, средняя подсвита; 7 – зоны надвигов; 8 – контур Угаханского минимума; 9 – региональная зона трещиноватости; 10 – Константиновский массив; 11 – контур территории месторождения Сухой Лог; 12 – положение месторождений сухоложского типа

Fig. 7. Geological and tectonic scheme of the Kropotkin ore cluster: 1 – poorly defined Riphean-Vendian sediments; 2–6 – sediments within the Marakano-Tunguska syncline, composing the Sukhoy Log deposit: 2 – Imnyakh Formation, upper sub-formation; 3 – Imnyakh Formation, lower sub-formation; 4 – Aunakit Formation, lower sub-formation; 5 – Khomolkho Formation, upper sub-formation; 6 – Khomolkho Formation, middle sub-formation; 7 – thrust zones; 8 – outline of the Ugahan low; 9 – regional fracture zone; 10 – Konstantinovsk intrusive body; 11 – outline of the territory of the Sukhoy Log deposit; 12 – location of the Sukhoy Log type deposits

Интрузивные образования вблизи месторождения представлены единственным Константиновским гранитоидным массивом, расположенным в 6 км юго-западнее месторождения. Массив расположен в краевой южной части Угаханского минимума, выделяемого в гравитационном поле двухсоттысячного масштаба. Данный минимум образован одноименным интрузивным телом (Угаханским плутоном) с параметрами примерно 10×14 км, с кровлей залегающей на глубине порядка 3 км [33]. Как отмечается этими же авторами, Константиновский массив является не апикалью более крупного Угаханского, а автономным силлом с подводящими каналами, по которым магматический материал поступал из того же, что и для Угаханского, очага. С силлом сопряжен дайковый пояс гранитоидов субширотного простирания, расположенный севернее от него. Породы осадочного чехла в области внедрения силла контактово метаморфизованы, что выразилось в их ороговиковании с выделением сульфидов, в том числе пирротина, а также оксидов железа. Возраст массива U-Pb методом по циркону и сфену составляет 650–530 и 270–310 млн лет соответственно [47]. Более современные геохронологические исследования циркона [59] подтвердили верхнекаменноугольный возраст формирования массива (303 ± 3 млн лет), что позволяет сделать вывод о единовременности формирования Угаханского плутона, Константиновского силла и Ангаро-Витимского батолита [56]. Месторождение приурочено к краевой юго-восточной части плутона.

Вмещающие и перекрывающие породы регионально метаморфизованы в хлорит-серицитовый субфации фации зеленых сланцев.

Породы хомолхинской свиты обогащены органическим веществом, благодаря чему приобрели свое название – углистые (черные) сланцы. Обилие органического вещества обусловлено жизнедеятельностью простейших морских организмов, принадлежащих к биоценозу сульфидредуцирующих бактерий [16]. Учитывая приобретенную осадками металлогеническую специализацию, некоторыми исследователями [16] предполагается прямая корреляционная связь между содержанием золота и Сорг. Другими исследователями [17] такая связь отрицается.

Основной структурой месторождения является сухоложская антиклиналь – положительная пликативная структура 3 порядка, асимметричная и опрокинутая на юг, характеризующаяся значительной степенью тектонической переработки (рис. 8). Месторождение приурочено к области ее периклинального замыкания, основное рудное тело локализовано в области пересечения шарнира с осевой плоскостью складки.

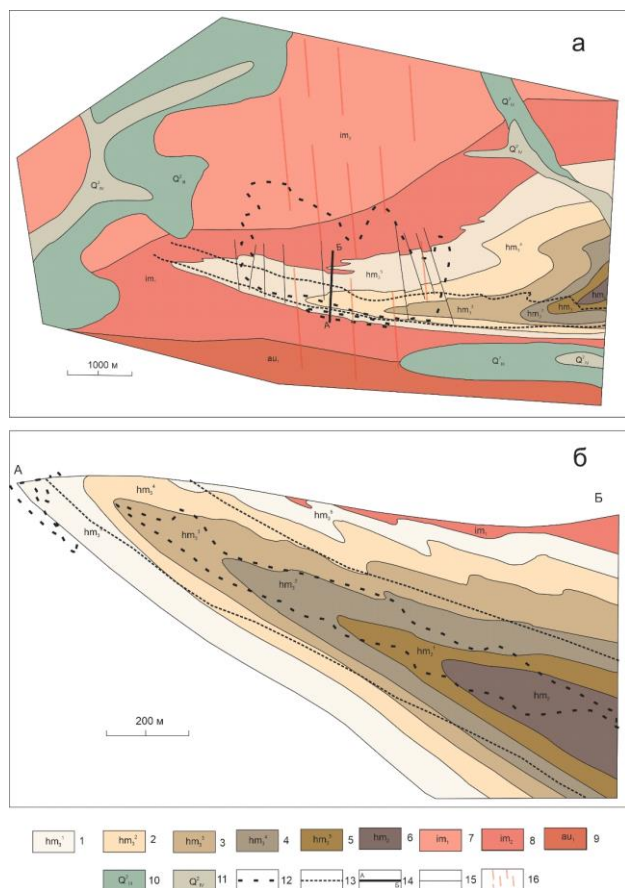


Рис. 8. Схематические геологическая карта (а) и разрез (б) месторождения Сухой Лог [17, 60–62, с дополнениями]: 1–5 – хомолхинская свита, верхняя подсвита: 1 – пятая пачка (алеuritистые сланцы с прослоями мелкозернистых песчаников); 2 – четвертая пачка (переслаивание филлитов и алевролитов); 3 – третья пачка (алеuritистые сланцы с прослоями известковых песчаников); 4 – вторая пачка (тонкослоистые филлиты); 5 – первая пачка (филлиты, известковые и углеродистые сланцы); 6 – хомолхинская свита, средняя подсвита; 7 – имняхская свита, верхняя подсвита; 8 – имняхская свита, нижняя подсвита; 9 – аунакитская свита, нижняя подсвита; 10, 11 – современные аллювиальные отложения: 10 – аллювий высокой и низкой пойм и озерно-болотные отложения; 11 – аллювий надпойменных террас; 12 – контуры пологопадающей рудной залежи; 13 – границы зоны расланцевания; 14 – линия разреза; 15 – разрывные нарушения; 16 – региональная зона трещиноватости

Fig. 8. Schematic geological map (a) and section (b) of the Sukhoy Log deposit [17, 60–62, with additions]: 1–5 – Khomolkho Formation, upper sub-formation: 1 – fifth pack (silty shale with interlayers of fine-grained sandstones); 2 – fourth pack (interbedded phyllites and siltstones); 3 – third pack (silty shale with interlayers of calcareous sandstones); 4 – second pack (thinly layered phyllites); 5 – first pack (phyllites, calcareous and carbonaceous shales); 6 – Khomolkho Formation, middle sub-formation; 7 – Imnyakh Formation, upper sub-formation; 8 – Imnyakh Formation, lower sub-formation; 9 – Aunakit Formation, lower sub-formation; 10, 11 – modern alluvial deposits: 10 – alluvium of high and low floodplains and lake-marsh sediments; 11 – alluvium of floodplain terraces; 12 – contours of the canopy ore deposit; 13 – boundaries of the stratification zone; 14 – section line; 15 – faults; 16 – regional fracture zone

Осевая плоскость складки падает в северном направлении под углом от 25° до 30° . Падение лежащего (подвернутого) крыла складки изменчиво: от 35° в западной части до 50° в восточной. Висячее крыло падает под углами от 10° до 15° . Шарнир складки погружается в северо-западном направлении под углами 0° – 15° [63]. Вдоль подвернутого крыла антиклинали отмечается взбросо-надвиговая зона субширотного простирания. Осевая плоскость осложнена зоной смятия, которой свойственны кливаж, сланцеватость, будинаж-структуры и мелкая складчатость.

Антиклиналь пересекает субмеридиональная зона трещиноватости, расположенная в пределах зоны разрывных нарушений над скрытым разломом фундамента [60]. Вдоль всей минерализованной зоны выделяется система секущих осевую плоскость диагональных разломов. Отмечается контроль поперечных деформаций антиклинали данной системой нарушений: на уровне денудаци-

онного среза отчетливо наблюдаются изгибы оси складки.

Как отмечается многими исследователями [2, 17, 35] на месторождении проявлен отчетливый структурный контроль оруденения. Он заключается в развитии наиболее интенсивно проявленной кварц-карбонатно-золотосульфидной минерализации преимущественно гнездово-прожилкового и прожилкового типа в области пересечения зоны смятия, ориентированной вдоль осевой плоскости антиклинали, и субмеридиональной зоны разрывных нарушений.

На месторождении проявлена наложенная гидротермально-метасоматическая минерализация, выраженная в замещении и перераспределении кварца, пирита и карбонатов [17, 35, 36].

Одной из важных характерных особенностей локализации золотого оруденения на месторождении является его приуроченность к метасоматизированным породам. При анализе взаимоотношений

метасоматических минеральных ассоциаций было выделено два этапа березетоидного метасоматизма: натриевой и калиевой направленности [17]. Первый этап, наложенный на регионально-метаморфизованные породы, происходил с образованием натриевых слюд (преимущественно парагонит) и магнезиально-железистых карбонатов. Как считают авторы, в данный этап кварц-сульфидная минерализация не образовывалась, что расходится с результатами исследований [38, 53, 57]. Второй этап накладывался на первый, что выразилось как в полном замещении натриевых слюд мусковитом, так и в формировании их ассоциаций. Помимо слюд также образовывались магнезиально-железистые карбонаты и кварц-сульфидная золотоносная минерализация. По мнению других исследователей, оруденение было сформировано за один золоторудный этап, в рамках которого, тем не менее, выделяется несколько генераций минералов без существенных перерывов, а отложение золота происходило непрерывно в течение всего этапа [35]. Натриевые слюды, по их мнению, являются диагенетическими или метаморфогенными, а образование калиевых слюд происходило в золоторудную стадию.

Оруденение связано с проявлениями кварц-карбонат-сульфидной наложенной минерализации в форме жил, прожилков и вкрапленников. Ее формирование происходило в два этапа [37, 38, 57]. Первый этап, в который сформировалась прожилково-вкрапленная кварц-сульфидная минерализация, датируется 447 ± 6 млн лет. Во второй этап, датируемый 321 ± 14 млн лет, сформировались золотоносные кварцевые жилы.

Текстуры сухоложских руд прожилково-вкрапленные, гнездово-линзовидные, в подчиненном количестве жильные кварцевого, кварц-карбонатного состава с незначительной примесью сульфидов. Промышленная золотоносность связана с сульфидной, почти исключительно пиритовой, минерализацией. Помимо пирита в виде самостоятельных макроскопических выделений из сульфидов встречается в весьма небольших количествах пирротин и на отдельных участках – арсенипирит. Они распространены в основном на глубоких горизонтах и флангах рудных тел. Во внешнем ореоле

рудной зоны, на крыльях антиклинальной складки, распространена рассеянная пиритовая вкрапленность в виде тонкозернистых пылевидных выделений. В пределах ядерной части Сухоложской антиклинали общая интенсивность пиритовой минерализации увеличивается в среднем до 3 %.

Заключение

Бодайбинский район характеризуется довольно сложной геодинамической историей. В течение длительного времени его формирования на окраине Сибирского кратона происходил целый ряд событий, способных привести к рудообразованию. Влияние некоторых из них подтверждается множеством исследований, и такие события выделяются как ключевые, влияние же других ввиду недостаточной доказательной базы либо отрицается, либо данные события просто игнорируются при составлении модели формирования месторождения. Так, подавляющее большинство исследователей сходится во мнении, что осадконакопление в условиях рифтогенеза способствовало накоплению геохимически специализированных отложений и являлось ключевым событием. Формирование вмещающих оруденение проницаемых структур на этапе линейного складкообразования, инициированного коллизионными процессами, также выделяется в ключевой этап и практически не оспаривается ввиду установленного структурного контроля оруденения, хотя бывают мнения, не укладывающиеся в устоявшуюся систему взглядов [64]. Основные споры ведутся касательно влияния событий постколлизийного этапа развития региона. Установлено неоднократное термальное влияние мантийного вещества на данном этапе [1, 55]. Предметом споров является характер проявления данного влияния: каковым было изменение структурно-вещественных комплексов на месторождении, происходило ли оно с привнесением вещества или являлось изохимическим? Приближение к ответу на данный вопрос позволит лучше понять модель формирования столь уникального месторождения, как Сухой Лог. Одним из способов приближения является анализ результатов геофизических методов, до этого активно не обсуждаемых в периодической литературе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Митрофанов Г.Л. Тектонические закономерности размещения и формирования месторождений благородных металлов южного обрамления Сибирской платформы: дис. ... д-ра геол.-минерал. наук. – М., 2006. – 44 с.
2. Иванов А.И. Рифейско-палеозойское рудообразование в Байкало-Патомской золоторудной провинции // Разведка и охрана недр. – 2009. – № 12. – С. 3–10.
3. Буряк В.А. Формирование золотого оруденения в углеродсодержащих толщах // Известия АН СССР. Сер. геол. – 1987. – № 12. – С. 94–105.
4. Multistage sedimentary and metamorphic origin of pyrite and gold in the giant Sukhoi Log deposit, Lena Goldfield, Russia / R.R. Large, V.V. Maslennikov, F. Robert, L.V. Danyushevsky // Econ. Geol. – 2007. – Vol. 102. – P. 1233–1267.
5. Age and pyrite Pb-isotopic composition of the giant Sukhoi Log sediment-hosted gold deposit, Russia / S. Meffre, R.R. Large, R. Scott, J. Woodhead // Geochim. et Cosmochim. Acta. – 2008. – Vol. 72. – P. 2377–2391.

6. Emsbo P., Koenig A.E. Discovery and significance of gold-rich bitumen in the Rodeo deposit, northern Carlin Trend, Nevada // *Geochimica et Cosmochimica Acta Supplement*. – 2005. – Vol. 69. – P. A123–A124.
7. Emsbo P., Koenig A.E. Transport of Au in petroleum: evidence from the northern Carlin Trend, Nevada // *Proceedings of the Ninth Biennial SGA Meeting*. – Dublin: SGA, 2007. – P. 695–698.
8. Titley S.R. Phanerozoic ocean cycles and sedimentary-rock-hosted gold ores // *Geology*. – 1991. – Vol. 19. – P. 645–648.
9. Highly metalliferous carbonaceous shale and Early Cambrian seawater / B. Lehmann, T.F. Nagler, H.D. Holland, M. Willie, J. Mao, J. Pan, D. Ma, P. Dulski // *Geology*. – 2007. – Vol. 35. – P. 403–406.
10. Distribution, character, and genesis of gold deposits in metamorphic terranes / R.J. Goldfarb, T. Baker, B. Dube, D.I. Groves, C.J.R. Hart, P. Gosselin // *Economic geology 100th anniversary volume*. – 2005. – P. 407–450.
11. Large R.R., Bull S.W., Maslennikov V.V. A carbonaceous sedimentary source rock model for Carlin-type and orogenic gold deposits // *Economic Geology*. – 2011. – Vol. 106. – P. 331–358.
12. Origin of high-grade gold ore, source of ore fluid components, and genesis of the Meikle and neighboring Carlin-type deposits, northern Carlin Trend, Nevada / P. Emsbo, A.H. Hofstra, E.A. Lauha, G.L. Griffin, R.W. Hutchinson // *Economic Geology*. – 2003. – Vol. 98. – P. 1069–1105.
13. Genesis and organic geochemical characteristics of the carbonaceous rock stratabound gold deposits, South China / K. Hu, J. Zhai, Y. Liu, H. Wang, J. Zhang, R. Jia // *Science in China*. – 2000. – Vol. 43. – P. 507–520.
14. Williams-Jones A.E., Migdisov A.A. The solubility of gold in crude oil: implications for ore genesis. // *Proc. of the Ninth Biennial SGA Meeting*. – Dublin: SGA, 2007. – P. 765–768.
15. Chang Z., Large R.R., Maslennikov V. Sulfur isotopes in sediment-hosted orogenic gold deposits: evidence for an early timing and a seawater sulfur source // *Geology*. – 2008. – Vol. 36. – P. 971–974.
16. О генезисе продуктивных «углистых» сланцев Ленского золотоносного района / М.П. Лобанов, А.В. Синцов, В.И. Сизых, С.Н. Коваленко // *Доклады РАН*. – 2004. – Т. 394 (3). – С. 360–363.
17. Околорудный метасоматизм терригенных углеродистых пород в Ленском золоторудном районе / В.Л. Русинов, О.В. Русинова, С.Г. Кряжев, Ю.В. Щегольков, Э.И. Алышева, С.Е. Борисовский // *Геология руд. Месторождений*. – 2008. – Т. 50 (1). – С. 3–46.
18. Ocean and atmosphere geochemical proxies derived from trace elements in marine pyrite: implications for ore genesis in sedimentary basins. / R.R. Large, I. Mukherjee, D.D. Gregory, J.A. Steadman, V.V. Maslennikov, S. Meffre // *Economic Geology*. – 2017. – Vol. 112 (2). – P. 423–450. DOI: <https://doi.org/10.2113/econgeo.112.2.423>
19. Kucha H. Platinum group metals in the Zechstein copper deposits, Poland // *Economic Geology*. – 1982. – Vol. 77. – P. 1578–1591.
20. Hannington M.D., Herzig P.M., Scott S.D. Auriferous hydrothermal precipitates on the modern seafloor // *Gold metallogeny and exploration* / Ed. by R.P. Foster. Glasgow, Blackie, 1991. – P. 249–275. DOI: 10.1007/978-94-011-2128-6_8.
21. Williams-Jones A., Migdisov A. Experimental constraints on the transport and deposition of metals in ore-forming hydrothermal systems // *Building Exploration Capability for the 21st Century*. – USA: Society of Economic Geologists Publishing, 2014. – Vol. 18. – P. 77–96.
22. Origin of gold ores in black-shale hosted deposits of the Bodaybo Region, Russia / E.V. Belogub, E.E. Palenova, A.V. Chugaev, O.Yu. Plotinskaya // *Acta Geologica Sinica (English Edition)*. – 2014. – Vol. 88 (supp. 2). – P. 252–253.
23. Онищенко С.А. Деформация и перекристаллизация сульфидных прослоев на золоторудном черносланцевом месторождении Голец Высочайший // *Литосфера*. – 2023. – Т. 23. – № 6. – С. 1059–1078.
24. Онищенко С.А., Сокерина Н.В. Особенности формирования золоторудного Черносланцевого месторождения Голец Высочайший (Бодайбинский рудный район // *Геология рудных месторождений*. – 2021. – Т. 63. – № 2. – С. 154–173.
25. Кряжев С.Г. Изотопно-геохимические и генетические модели золоторудных месторождений в углеродисто-терригенных толщах // *Отечественная геология*. – 2017. – № 1. – С. 28–38.
26. Наложённые деформации Герцинского времени в структуре месторождения Голец Высочайший (Байкало-Патомский пояс), 40AR/39Ar данные / В.А. Ванин, А.М. Мазукабзов, Д.С. Юдин, А.В. Блинов, Ю.И. Тарасова // *Геодинамика и тектонофизика*. – 2022. – Т. 13. – № 1. DOI: 10.5800/GT-2022-13-1-0575.
27. Брюханова Н.Н. Влияние CO₂ на формирование рудообразующего флюида месторождения Сухой Лог (Байкало-Патомское нагорье) // *Современные направления развития геохимии: материалы Всероссийской конференции (с участием зарубежных ученых), посвящённой 65-летию Института геохимии им. А.П. Виноградова и 105-летию со дня рождения академика Л.В. Таусона*. – Иркутск, 21–25 ноября 2022. – Иркутск: Институт географии им. В.Б. Сочавы Сибирского отделения Российской академии наук, 2022. – С. 70–73.
28. Orogenic gold deposits: a proposed classification in the context of their crustal distribution and relationship to other gold deposit types / D.I. Groves, R.J. Goldfarb, M. Gebre-Mariam, S.G. Hagemann, F. Robert // *Ore Geology Reviews*. – 1998. – Vol. 13 (1–5). – P. 7–27.
29. Goldfarb R.J., Pitcairn I. Orogenic gold: is a genetic association with magmatism realistic? // *Mineral. Deposita*. – 2023. – Vol. 58 (1). – P. 5–35 (2023).
30. Meyer F.M. Case histories of orogenic gold deposits // *Minerals*. – 2023. – Vol. 13 (3). – P. 369.
31. Lead isotope systematics of the orogenic gold deposits of the Baikal-Muya Belt (Northern Transbaikalia): contribution of the subcontinental lithospheric mantle in their genesis / A.V. Chugaev, V.A. Vanin, I.V. Chernyshev, K.N. Shatagin, I.V. Rassokhina, A.S. Sadasuyuk // *Geochem. International*. – 2022. – Vol. 60. – P. 1352–1379.
32. Шер С.Д. Околорудные изменения, сопутствующие золото-кварцевым жилам в Ленском золотоносном районе // *Метасоматические изменения боковых пород и их роль в рудообразовании* / под ред. Н.И. Наковника. – М.: Недра, 1966. – С. 282–291.
33. Лишневский Э.Н., Дистлер В.В. Глубинное строение земной коры района золото-платинового месторождения Сухой Лог по геолого-геофизическим данным (Восточная Сибирь, Россия) // *Геология рудных месторождений*. – 2004. – Т. 46 (1). – С. 88–104.

34. Петролого-геохимические черты околорудного метасоматизма в золоторудном месторождении Сухой Лог (Ленский район). Ч. 1. Обзор петролого-геохимических исследований рудовмещающего субстрата / И.В. Кучеренко, Р.Ю. Гаврилов, В.Г. Мартыненко, А.В. Верховин // Известия Томского политехнического университета. – 2011. – Т. 319. – № 1. – С. 35–41.
35. Юдовская М.А., Дистлер В.В., Родионов Н.В., Мохов А.В., Антонов А.В., Сергеев С.А. Соотношение процессов метаморфизма и рудообразования на золотом черносланцевом месторождении Сухой Лог по данным U-Th-Pb- изотопного SHRIMP-датирования акцессорных минералов // Геология рудных месторождений. – 2011. – Т. 53 (1). – С. 32–64.
36. Gold mineralisation and orogenic metamorphism in the Lena province of Siberia as assessed from Chertovo Koryto and Sukhoi Log deposits / M.A. Yudovskaya, V.V. Distler, V.Yu. Prokofiev, N.N. Akinfiev // Geoscience Frontiers. – 2016. – Vol. 7 (3). – P. 453–481. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2015.07.010>.
37. Chugaev A.V. Orogenic gold deposits of Northern Transbaikalia, Russia: geology, age, sources, and genesis // Geochem. Int. – 2024. – Vol. 62. – P. 909–978. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0016702924700484>
38. 40Ar-39Ar and Rb-Sr age constraints on the formation of Sukhoi-Log-style orogenic gold deposits of the Bodaibo District (Northern Transbaikalia, Russia) / A.V. Chugaev, A.E. Budyak, Yu.O. Larionova, I.V. Chernyshev, A.V. Travin, Yu.I. Tarasova, B.I. Gareev, G.I. Batalin, I.V. Rassokhina, T.I. Oleinikova // Ore Geology Reviews. 2022. – Vol. 144. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2022.104855>
39. Особенности формирования золоторудной минерализации в условиях амфиболитовой фации метаморфизма: месторождение Ыкан (Байкало-Патомский пояс) / А.Е. Будяк, Ю.И. Тарасова, А.В. Чугаев, Н.А. Горячев, Т.А. Веливецкая, А.В. Игнатьев // Тихоокеанская геология. – 2024. – Т. 43. – № 3. – С. 64–87. DOI: 10.30911/0207-4028-2024-43-3-64-87
40. Геолого-минералогические и геохимические особенности золоторудного месторождения Угахан «Сухоложского» типа / А.Е. Будяк, Ю.И. Тарасова, А.В. Чугаев, Н.А. Горячев // Геология и геофизика. – 2024. – Т. 65. – № 3. – С. 446–470. DOI: 10.15372/GiG2023132.
41. Колмаков Ю.В. Вещественная и петрофизическая эволюция минералообразующей системы золоторудного месторождения Чертова корыто (Патомское нагорье, Россия) // Минералообразующие системы месторождений высокотехнологичных металлов: достижения и перспективы исследований : Всероссийская конференция, проводимая в рамках мероприятий, посвященных 300-летию РАН. – М.: Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, 2023. – С. 93–96.
42. Минералы РЗЭ в черных сланцах раннепротерозойской михайловской свиты (Байкало-Патомское нагорье, Сибирь) / Е.Е. Паленова, Е.А. Рожкова, Е.В. Белогуб, М.А. Рассомахин // Минералогия. – 2022. – Т. 8. – № 3. – С. 47–66.
43. Quartz-hosted fluid inclusions in commercial ores of various type at the Verninskoe gold deposit, Bodaibo District, Russia / A.A. Kotov, V.Yu. Prokofiev, A.V. Volkov, T.M. Zlobina, K.Yu. Murashov // Geochem. International. – 2023. – Vol. 61. – P. 517–528. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0016702923040079>
44. Глубинное строение и геодинамика Саяно-Байкальской горной области и сопредельных районов Восточной Сибири / А.М. Алакшин, С.В. Лысак, Б.М. Письменный, А.В. Поспеев, Е.В. Поспеева // Глубинное строение территории СССР. – М.: Наука, 1991. – С. 88–105.
45. Докембрий Патомского нагорья / А.И. Иванов, В.И. Лившиц, О.В. Перевалов, Т.М. Страхова, Б.В. Яблоновский. – М.: Недра, 1995. – 352 с.
46. Колмаков Ю.В. Геолого-петрофизические характеристики месторождений золота в протерозойских углеродистых толщах Восточной Сибири как основа прогнозной интерпретации аэрогеофизических данных: дис. ... д-ра геол.-минерал. наук. – Томск, 2021. – 272 с.
47. Этапы формирования Бодайбинского золоторудного района / И.К. Рундквист, В.А. Бобров, Т.Н. Смирнова, М.Ю. Смирнов, М.Ю. Данилова, А.А. Ащеулов // Геология руд. Месторождений. – 1992. – Т. 34 (6). – С. 3–15.
48. Немеров В.К., Станевич А.М. Эволюция рифей-вендских обстановок биолитогенеза Байкальской горной области // Геология и геофизика – 2001. – Т. 42 (3). – С. 456–470.
49. Возраст детритовых цирконов и источники сноса терригенных пород хомолхинской свиты (Южный фланг Бодайбинской зоны Патомского нагорья) / Е.Ю. Рыцк, В.П. Ковач, А.Е. Будяк, Е.В. Толмачева, А.В. Чугаев, Е.В. Адамская, А.М. Федосеенко // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса от океана к континенту. – Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2022. – Т. 20. – С. 250–252.
50. Тарасова Ю.И., Будяк А.Е. Стадийность формирования рудной зоны Холоднинского колчеданно-полиметаллического месторождения // Науч. о Земле и недропользование. – 2023. – Т. 46. – № 2 (83). – С. 201–211. DOI: 10.21285/2686-9993-2023-46-2-201-211.
51. Гусев Г.С., Песков А.И., Соколов С.К. Палеогеодинамика Муйского сегмента протерозойского Байкало-Витимского пояса // Геотектоника. – 1992. – № 2. – С. 72–86.
52. Конников Э.Г., Цыганков А.А., Врублевская Т.Т. Байкало-Муйский вулканоплутонический пояс: структурно-вещественные комплексы и геодинамика / науч. ред. М.И. Кузьмин. – М.: ГЕОС, 1999. – 163 с.
53. Новые данные об условиях рудоотложения и составе рудообразующих флюидов золото-платинового месторождения Сухой Лог / Н.П. Лавров, В.Ю. Прокофьев, В.В. Дистлер, М.А. Юдовская, А.М. Спиридонов, В.И. Гребенщикова, Н.Л. Матиль // Доклады РАН. – 2000. – Т. 371 (1). – С. 88–92.
54. Geology, composition and genesis of the Sukhoi Log noble metals deposit, Russia / V.V. Distler, M.A. Yudovskaya, G.L. Mitrofanov, V.Yu. Prokofiev // Ore Geol. Reviews. – 2004. – Vol. 24 (1–2). – P. 7–44.
55. Ярмолюк В.В., Коваленко В.И., Кузьмин М.И. Северо-Азиатский суперплюм в фанерозое: магматизм и глубинная геодинамика // Геотектоника. – 2000. – № 5. – С. 3–29.
56. Хубанов В.Б., Цыганков А.А., Бурмакина Г.Н. Продолжительность и геодинамика формирования Ангаро-Витимского батолита: по данным U-Pb изотопного LA-ICP-MS датирования магматических и детритовых цирконов // Геология и геофизика. – 2021. – Т. 62 (12). – С. 1619–1641. DOI: 10.15372/GiG2021112.

57. Этапы формирования крупномасштабной благороднометальной минерализации месторождения Сухой Лог (Восточная Сибирь): результаты изотопно-геохронологического изучения / Н.П. Лаверов, И.В. Чернышев, А.В. Чугаев, Е.Д. Бадирова // Доклады РАН. – 2007. – Т. 415 (2). – С. 236–241.
58. Typomorphic features and source of native gold from the Sykhai Log Area Placer Deposits, Bodaibo gold-bearing district, Siberia, Russia / A. Lalomov, A. Grigorieva, A. Kotov, L. Ivanova // Minerals. – 2023. – Vol. 13 (5). – P. 707. DOI: <https://doi.org/10.3390/min13050707>
59. Результаты исследования циркона (SIMS) из гранитоидов Константиновского штока (район золоторудного месторождения Сухой Лог): возраст, источники и геологические следствия / Е.Ю. Рыцк, Е.В. Толмачева, С.Д. Великославинский, А.Б. Кузнецов, Н.В. Родионов, А.А. Андреев, А.М. Федосеев // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. – 2021. – Т. 496. – № 2. – С. 169–175. DOI: 10.31857/S2686739721020171.
60. Яновский В.М. Рудоконтролирующие структуры терригенных миогеосинклиналей. – М.: Недра, 1990. – 244 с.
61. Золоторудные месторождения СССР. Т. 3. Геология золоторудных месторождений Западной и Восточной Сибири. – М.: ЦНИГРИ, 1986. – С. 173–191.
62. Современная геолого-экономическая оценка месторождения Сухой Лог / И.А. Карпенко, И.Ф. Мигачев, Б.К. Михайлов, Н.Г. Петраш // Руды и металлы. – 2006. – № 2. – С. 22–27.
63. Иванов А.И. Основные черты геологического строения и золотоносность Бодайбинского рудного района // Руды и металлы. – 2008. – № 3. – С. 43–61.
64. Ванин В.А., Мазукабзов А.М. Парадокс в изучении месторождения - гиганта Сухой лог // Геология на окраине континента: Материалы II молодежной научной конференции-школы ДВГИ ДВО РАН, Владивосток. – Владивосток: Дальневосточный федеральный университет, 2022. – С. 133–135.

Информация об авторах

Владимир Валерьевич Слоквенко, аспирант, ассистент отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30; Vvs120@tpu.ru

Юрий Викторович Колмаков, доктор геолого-минералогических наук, доцент отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30; kolmakovyv@tpu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2525-9214>

Поступила в редакцию: 14.03.2025

Поступила после рецензирования: 24.03.2025

Принята к публикации: 18.06.2025

REFERENCES

1. Mitrofanov G.L. *Tectonic regularities of noble metals deposits allocation and formation of the Siberian platform south margins*. Dr. Diss. Moscow, 2006. 44 p. (In Russ.)
2. Ivanov A.I. Riphean–Paleozoic ore formation in the Baikal-Patom gold province. *Razvedka i okhrana nedr*, 2009, no. 12, pp. 3–10. (In Russ.)
3. Buryak V.A. Formation of gold mineralization in carbon-containing strata. *Izvestiya of the Academy of sciences of the U.S.S.R.*, 1987, no. 12, pp. 94–105. (In Russ.)
4. Large R.R., Maslennikov V.V., Robert F., Danuishevsky L.V. Multistage sedimentary and metamorphic origin of pyrite and gold in the giant Sukhoi Log deposit, Lena Goldfield, Russia. *Econ. Geol.*, 2007, vol. 102, pp. 1233–1267.
5. Meffre S., Large R.R., Scott R., Woodhead J. Age and pyrite Pb-isotopic composition of the giant Sukhoi Log sediment-hosted gold deposit, Russia. *Geochim. et Cosmochim. Acta*, 2008, vol. 72, pp. 2377–2391.
6. Emsbo P., Koenig A.E. Discovery and significance of gold-rich bitumen in the Rodeo deposit, northern Carlin Trend, Nevada. *Geochimica et Cosmochimica Acta Supplement*, 2005, vol. 69, pp. A123–A124.
7. Emsbo P., Koenig A.E. Transport of Au in petroleum: evidence from the northern Carlin Trend, Nevada. *Proc. of the Ninth Biennial SGA Meeting*. Dublin, SGA, 2007. pp. 695–698.
8. Titley S.R. Phanerozoic ocean cycles and sedimentary-rock-hosted gold ores. *Geology*, 1991, vol. 19, pp. 645–648.
9. Lehmann B., Nagler T.F., Holland H.D., Willie M., Mao J., Pan J., Ma D., Dulski P. Highly metalliferous carbonaceous shale and Early Cambrian seawater. *Geology*, 2007, vol. 35, pp. 403–406.
10. Goldfarb R.J., Baker T., Dube B., Groves D.I., Hart C.J.R., Gosselin P. Distribution, character, and genesis of gold deposits in metamorphic terranes. *Economic geology 100th anniversary volume*, 2005, pp. 407–450.
11. Large R.R., Bull S.W., Maslennikov V.V. A carbonaceous sedimentary source rock model for Carlin-type and orogenic gold deposits. *Economic Geology*, 2011, vol. 106, pp. 331–358.
12. Emsbo P., Hofstra A.H., Lauha E.A., Griffin G.L., Hutchinson R.W. Origin of high-grade gold ore, source of ore fluid components, and genesis of the Meikle and neighboring Carlin-type deposits, northern Carlin Trend, Nevada. *Economic Geology*, 2003, vol. 98, pp. 1069–1105.
13. Hu K., Zhai J., Liu Y., Wang H., Zhang J., Jia R. Genesis and organic geochemical characteristics of the carbonaceous rock stratabound gold deposits, South China. *Science in China*, 2000, vol. 43, pp. 507–520.
14. Williams-Jones A.E., Migdisov A.A. The solubility of gold in crude oil: implications for ore genesis. *Proc. of the Ninth Biennial SGA Meeting*. Dublin, Society for Geology Applied to Mineral Deposits, 2007. pp. 765–768.

15. Chang Z., Large R.R., Maslennikov V. Sulfur isotopes in sediment- hosted orogenic gold deposits: Evidence for an early timing and a seawater sulfur source. *Geology*, 2008, vol. 36, pp. 971–974.
16. Lobanov M.P., Sintsov A.V., Sizykh V.I., Kovalenko S.N. On the genesis of productive “carbonaceous” shales of the Lena gold-bearing area. *Doklady of the Academy of sciences of Russia*, 2004, vol. 394, no. 3, pp. 360–363. (In Russ.)
17. Rusinov V.L., Rusinova O.V., Kryazhev S.G., Shchegolkov Yu.V., Alysheva E.I., Borisovskii S.E. Near-ore metasomatism of terrigenous carbonaceous rocks in the Lena gold ore region. *Geology of ore deposits*, 2008, vol. 50, no. 1, pp. 1–44. (In Russ.)
18. Large R.R., Mukherjee I., Gregory D.D., Steadman J.A., Maslennikov V.V., Meffre S. Ocean and atmosphere geochemical proxies derived from trace elements in marine pyrite: implications for ore genesis in sedimentary basins. *Economic Geology*, 2017, vol. 112, no. 2, pp. 423–450. DOI: <https://doi.org/10.2113/econgeo.112.2.423>
19. Kucha H. Platinum group metals in the Zechstein copper deposits, Poland. *Economic Geology*, 1982, vol. 77, pp. 1578–1591.
20. Hannington M.D., Herzig P.M., Scott S.D. Auriferous hydrothermal precipitates on the modern seafloor. *Gold metallogeny and exploration*. Ed. by R.P. Foster. Glasgow, Blackie, 1991. pp. 249–275. DOI: 10.1007/978-94-011-2128-6_8.
21. Williams-Jones A., Migdisov A. Experimental constraints on the transport and deposition of metals in ore-forming hydrothermal systems. *Building Exploration Capability for the 21st Century*. USA, Society of Economic Geologists Publ., 2014. Vol. 18, pp. 77–96.
22. Belogub E.V., Palenova E.E., Chugaev A.V., Plotinskaya O.Yu. Origin of gold ores in black-shale hosted deposits of the Bodaybo Region, Russia. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 2014, vol. 88 (suppl. 2), pp. 252–253.
23. Onishchenko S.A. Deformation and recrystallization of sulfide interlayers at the Golets Vysochaishii Gold-Ore Black-Shale Deposit. *Lithosphere*, 2023, vol. 23, no. 6, pp. 1059–1078. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2023-23-6-1059-1078>.
24. Onishchenko S.A., Sokerina N.V. Features of the formation of the Golets Vysoschaishii Gold-Ore Black-Shale Deposit (Bodaibo Ore District). *Geology of Ore Deposits*, 2021, vol. 63, no. 2, pp. 138–155. DOI: 10.1134/S1075701521020045. (In Russ.)
25. Kryazhev S.G. Isotopic geochemic and genetic models of the gold ore deposits into the carbon bearing terrigenous series. *Domestic geology*, 2017, no. 1, pp. 28–38. (In Russ.)
26. Vanin V.A., Mazukabzov A.M., Yudin D.S., Blinov A.V., Tarasova Yu.I. The hercynian imposed deformations in the Golets Vysochaishii deposit structure (Baikal-Patom Belt), ⁴⁰Ar/³⁹Ar data. *Geodynamics & Tectonophysics*, 2022, vol. 13, no. 1, pp. 05–75. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.5800/GT-2022-13-1-0575>
27. Bryukhanova N.N. Influence of CO₂ on the formation of ore-forming fluid of the Sukhoi Log deposit (Baikal-Patom Belt). *Modern directions of geochemistry development. Proc. of the All-Russian Conference devoted to the 65th anniversary of the A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry and the 105th anniversary of the birth of Academician L.V. Towson*. Irkutsk, V.B. Sochava Institute of Geography SB RAS Publ., 2022. pp. 70–73.
28. Groves D.I., Goldfarb R.J., Gebre-Mariam M., Hagemann S.G., Robert F. Orogenic gold deposits: a proposed classification in the context of their crustal distribution and relationship to other gold deposit types. *Ore Geology Reviews*, 1998, vol. 13, pp. 7–27.
29. Goldfarb R.J., Pitcairn I. Orogenic gold: is a genetic association with magmatism realistic? *Mineralium Deposita*, 2023, vol. 58, no. 1, pp. 5–35.
30. Meyer F.M. Case histories of orogenic gold deposits. *Minerals*, 2023, vol. 13, no. 3, pp. 369.
31. Chugaev A.V., Vanin V.A., Chernyshev I.V., Shatagin K.N., Rassokhina I.V., Sadasyuk A.S. Lead isotope systematics of the orogenic gold deposits of the Baikal-Muya Belt (Northern Transbaikalia): contribution of the subcontinental lithospheric mantle in their genesis. *Geochem. International*, 2022, vol. 60, pp. 1352–1379.
32. Sher S.D. Wallrock alteration accompanying gold-quartz veins in the Lena gold-bearing district. *Metasomatic alterations of the lateral rocks and their part in ore formation*. Ed. by N.I. Nakovnik. Moscow, Nedra Publ., 1966. pp. 282–291. (In Russ.)
33. Lishnevskiy E.N., Distler V.V. Crustal depth structure of the Sukhoi Log gold-platinum deposit area based on geological and geophysical data (Eastern Siberia, Russia). *Geology of ore deposits*, 2004, vol. 46, no. 1, pp. 88–104. (In Russ.)
34. Kucherenko I.V., Gavrilov R.Yu., Martynenko V.G., Verkhovzin A.V. Petrologic and geochemic features of the near ore metasomatism in gold ore deposit Sukhoi Log (Lenskii region). Part 1. Review of petrological and geochemical studies of the ore-bearing substrate. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2012, vol. 320, no. 1, pp. 28–37. (In Russ.)
35. Yudovskaya M.A., Distler V.V., Rodionov N.V., Mokhov A.V., Antonov A.V., Sergeev S.A. Relationship between metamorphism and ore formation at the Sukhoi Log gold deposit hosted in black slates from the data of UThPb isotopic SHRIMP dating of access minerals. *Geology of ore deposits*, 2011, vol. 53, Iss. 1, pp. 27–57.
36. Yudovskaya M.A., Distler V.V., Prokofiev V.Yu., Akiniev N.N. Gold mineralization and orogenic metamorphism in the Lena province of Siberia as assessed from Chertovo Koryto and Sukhoi Log deposits. *Geoscience Frontiers*, 2015, no. 7, pp. 453–481. DOI: 10.1016/j.gsf.2015.07.010.
37. Chugaev A.V. Orogenic gold deposits of Northern Transbaikalia, Russia: geology, age, sources, and genesis. *Geochem. Int.*, 2024, vol. 62, pp. 909–978. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0016702924700484>
38. Chugaev A.V., Budyak A.E., Larionova Yu.O., Chernyshev I.V., Travin A.V., Tarasova Yu.I., Gareev B.I., Batalin G.I., Rassokhina I.V., Oleinikova T.I. 40Ar-39Ar and Rb-Sr age constraints on the formation of Sukhoi-Log-style orogenic gold deposits of the Bodaibo District (Northern Transbaikalia, Russia). *Ore Geology Reviews*, 2022, vol. 144. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2022.104855>
39. Budyak A.E., Tarasova Yu.V., Goryachev N.A., Velivetskaya T.A., Ignatiev A.V. Formation of gold mineralization in the amphibolite phase of metamorphism: the Ykan deposit (Baikal-Patom belt). *Pacific geology*, 2024, vol. 43, no. 3, pp. 64–87. (In Russ.) DOI: 10.30911/0207-4028-2024-43-3-64-87
40. Budyak A.E., Tarasova Y.I., Chugaev A.A., Goryachev N.A. Geological, mineralogical and geochemical features of the Sukhoi Log type gold deposit Ugakhan. *Geology and geophysics*, 2024, vol. 65, no. 3, pp. 446–470. (In Russ.) DOI: 10.15372/GiG2023132.
41. Kolmakov Yu.V. Substantial and petrophysical evolution of the mineral-forming system of the Chertovo Koryto gold deposit (Patom Highlands, Russia). *Mineral-forming systems of high-tech metal deposits: achievements and prospects of research*. Moscow, Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry RAS Publ., 2023. pp. 93–96. (In Russ.)

42. Palenova E.E., Rozhkova E.A., Belogub E.E., Rozhkova E.A., Belogub E.V., Rassomakhin M.V., Rassomakhin M.A. REE minerals in black shales of the Early Proterozoic Mikhailovskaya Formation (Baikal-Patom Plateau, Siberia). *Mineralogy*, 2022, vol. 8, no. 3, pp. 47–66. (In Russ.)
43. Kotov A.A., Prokofiev V.Y., Volkov A.V., Zlobina T. M., Murashov k. Yu. Quartz-hosted fluid inclusions in commercial ores of various type at the Verninskoe Gold Deposit, Bodaibo District, Russia. *Geochem. International*, 2023, vol. 61, pp. 517–528. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0016702923040079>
44. Alakshin A.M., Lysak S.V., Pismenny B.M., Pospeev A.V., Pospeeva E.V. Depth structure and geodynamics of the Sayano-Baikal mountain region and adjacent areas of Eastern Siberia. *Depth structure of the USSR territory*. Moscow, Nauka Publ., 1991. pp. 88–105. (In Russ.)
45. Ivanov A.I., Livshits V.I., Perevalov O.V., Strakhova T.M., Yablonovsky B.V. *Precambrian of the Patom Highlands*. Moscow, Nedra Publ., 1995. 352 p. (In Russ.)
46. Kolmakov Yu.V. *Geological and petrophysical characteristics of gold deposits in Proterozoic carbonaceous strata of East Siberia as a basis for predictive interpretation of airborne geophysical data*. Dr. Diss. Tomsk, 2021, 272 p. (In Russ.)
47. Rundquist I.K., Bobrov V.A., Smirnova T.N., Smirnov M.Y., Danilova M.Y., Ascheulov A.A. Stages of formation of the Bodaibo gold bearing district. *Geology of Ore Deposits*, 1992, vol. 34, no. 6, pp. 3–15. (In Russ.)
48. Nemerov V.K., Stanevich A.M. Evolution of the Riphean-Vendian settings of biolithogenesis of the Baikal Mountains. *Geology and Geophysics*, 2001, vol. 42, no. 3, pp. 456–470. (In Russ.)
49. Ryt'sk E.Yu., Chugaev A.V., Adam'skaya E.V., Fedoseenko A.M. Age of detrital zircons and sources of demolition of terrigenous rocks of the Khomolkhinskaya Formation (Southern flank of the Bodaibinskaya Zone of the Patom Plateau). *Geodynamic Evolution of Lithosphere of the Central Asian Mobile Belt from Ocean to Continent*. Irkutsk, Institute of Earth Crust SB RAS Publ., 2022. Vol. 20, pp. 250–252. (In Russ.)
50. Tarasova Yu.I., Budyak A.E. Formation stages of the Kholodninskoye pyrite-polymetallic deposit ore zone. *Earth sciences and subsoil use*, 2023, vol. 46, no. 2, pp. 201–211. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2023-46-2-201-211>.
51. Gusev G.S., Peskov A.I., Sokolov S.K. Paleogeodynamics of the Muisk segment of the Proterozoic Baikal-Vitimsk belt. *Geotectonics*, 1992, no. 2, pp. 72–86. (In Russ.)
52. Konnikov E.G., Tsygankov A.A., Vrublevskaya T.T. *Baikal-Muysk volcanic-plutonic belt: structural-material complexes and geodynamics*. Ed. by M.I. Kuzmin. Moscow, GEOS Publ., 1999. 163 p. (In Russ.)
53. Laverov N.P., Prokofiev V.Y., Distler V.V., Yudovskaya M.A., Spiridonov A.M., Grebenshchikova V.I., Matel N.L. New data on conditions of ore deposition and composition of ore-forming fluids of the Sukhoi Log gold-platinum deposit. *Doklady of the Russian Academy of Science*, 2000, vol. 371, no. 1, pp. 88–92. (In Russ.)
54. Distler V.V., Yudovskaya M.A., Mitrofanov G.L., Prokofiev V.Yu. Geology, composition and genesis of the Sukhoi Log noble metals deposit, Russia. *Ore Geol. Reviews*, 2004, vol. 24, pp. 7–44.
55. Yarmolyuk V.V., Kovalenko V.I., Kuzmin M.I. North-Asian superplume in the Phanerozoic: magmatism and deep geodynamics. *Geotectonics*, 2000, no. 5, pp. 3–29. (In Russ.)
56. Khubanov V.B., Tsygankov A.A., Burmakina G.N. Duration and geodynamics of the Angaro-Vitimsky batholith formation: based on U-Pb isotopic LA-ICP-MS dating of magmatic and detrital zircons. *Geology and Geophysics*, 2021, vol 62, no. 12, pp. 1619–1641. (In Russ.) DOI: 10.15372/GiG2021112.
57. Laverov N.P., Chernyshev I.V., Chugaev A.V., Chugaev A.V., Badirova E.D. Stages of formation of large-scale noble-metal mineralization of the Sukhoi Log deposit (Eastern Siberia): results of isotope-geochronological study. *Doklady of the Russian Academy of science*, 2007, vol. 415, no. 2, pp. 236–241. (In Russ.)
58. Lalomov A., Grigorieva A., Kotov A., Ivanova L. Typomorphic features and source of native gold from the Sykhoi Log Area Placer Deposits, Bodaibo Gold-Bearing District, Siberia, Russia. *Minerals*, 2023, vol. 13, no. 5. DOI: <https://doi.org/10.3390/min13050707>
59. Ryt'sk E.Yu., Velikoslavinsky S.D., Kuznetsov A.B., Rodionov N.V., Andreev A.A., Fedoseenko A.M. Results of the study of zircon (SIMS) from granitoids of the Konstantinovskiy Stock (area of the Sukhoi Log gold deposit): age, sources and geologic implications. *Doklady of the Russian Academy of science*, 2021, vol. 496, no. 2, pp. 169–175. (In Russ.) DOI: 10.31857/S2686739721020171.
60. Yanovsky V.M. *Ore-controlling structures of terrigenous myogeosynclines*. Moscow, Nedra Publ., 1990. 244 p. (In Russ.)
61. *Gold ore deposits of the USSR. Vol. 3. Geology of gold ore deposits of Western and Eastern Siberia*. Moscow, Central Geological Research Institute for Nonferrous and Precious Metals Publ., 1986. pp. 173–191. (In Russ.)
62. Karpenko I.A., Migachev I.F., Mikhailov B.K., Petrash N.G. Modern geological and economic evaluation of the Sukhoi Log deposit. *Ores and Metals*, 2006, no. 2, pp. 22–27. (In Russ.)
63. Ivanov A.I. Main features of geological structure and gold content of the Bodaibo gold bearing district. *Ores and Metals*, 2008, no. 3, pp. 43–61. (In Russ.)
64. Vanin V.A., Mazukabzov A.M. Paradox in the study of the giant Sukhoi Log deposit. Geology on the continental margin. *Proc. of the II Youth Scientific Conference-School of the Far Eastern Federal University of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok*. Vladivostok, Far Eastern Federal University Publ., 2022. pp. 133–135.

Information about the authors

Vladimir V. Slokvenko, Postgraduate Student, Assistant, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. Vvs120@tpu.ru

Yuri V. Kolmakov, Dr. Sc., Associate Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation; kolmakovyv@tpu.ru

Recieved: 14.03.2025

Revised: 24.03.2025

Accepted: 18.06.2025

УДК 674.047.3, 510.644.4
DOI: 10.18799/24131830/2025/7/5201
Шифр специальности ВАК: 2.3.2, 2.3.3
Научная статья

Исследование переходных процессов осциллирующего метода управления сушкой древесины для синтеза алгоритмов подстройки параметров резистивных датчиков влажности

В.В. Гречушников[✉], С.В. Прохоров, А.А. Шилин

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск

[✉]grechvv@tpu.ru

Аннотация. Актуальность. Применение резистивных датчиков влажности пиломатериала позволяет повысить уровень автоматизации. Однако достоверность показаний таких датчиков следует проверять, поскольку отказоустойчивость резистивных датчиков достаточно низкая. В работе рассматривается актуальная задача контроля работы, выявления отказов и настройки параметров датчиков влажности пиломатериала по переходным процессам осциллирующего метода сушки на основании показаний более надёжных и отказоустойчивых датчиков температуры. Данный метод сопровождается разнообразными переходными процессами, в которых может содержаться полезная информация, дающая возможность оценивать качество сушки и основные показатели технологического процесса. **Цель:** разработка алгоритма оценки влажности пиломатериала на основе анализа переходных процессов датчиков температуры для оценки корректности работы резистивных датчиков, настройки параметров тарирования. **Методы:** анализ переходных процессов из архивной базы о технологических процессах, полученных в течение полутора лет работы системы диспетчеризации основных параметров для 28 полных циклов сушки пиломатериала. Анализ основан на выявлении корреляции времени остывания и нагрева воздуха при открытии и закрытии заслонок. В условиях закрытых заслонок исследуется возможность определения влажности пиломатериала на основе аппроксимации зависимости от равновесной влажности. **Результаты.** Разработаны алгоритмы автоматизированной подстройки параметров тарирования резистивных датчиков на основе аппроксимации вычисления влажности пиломатериала по равновесной влажности воздуха, автоматического управления режимом сушки пиломатериалов в зависимости от показаний резистивных датчиков влажности. **Выводы.** Анализ зависимости времени переходного процесса остывания и нагрева влажного датчика имеет слабую корреляцию с влажностью пиломатериала и не может обеспечить адекватную оценку влажности. В условиях, когда заслонки закрыты в течение 30–40 минут можно наблюдать равновесную влажность пиломатериала с погрешностью до 2 %, что позволяет подстраивать резистивные датчики для непрерывного наблюдения за влажностью пиломатериала. Исследование может представить интерес для инженерно-технических работников лесной промышленности, занимающихся созданием современных систем автоматизации и улучшением существующих методов управления процессами сушки древесины. Работа может служить основой для разработки новых методов и алгоритмов управления технологическим процессом сушки на основе анализа переходных процессов и получения дополнительных параметров.

Ключевые слова: осциллирующий метод сушки, резистивный датчик влажности, переходные процессы, управление режимом сушки, автоматизация, эквивалентное содержание влаги в древесине

Для цитирования: Гречушников В.В., Шилин А.А., Прохоров С.В. Исследование переходных процессов осциллирующего метода управления сушкой древесины для синтеза алгоритмов подстройки параметров резистивных датчиков влажности // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 7. – С. 174–188. DOI: 10.18799/24131830/2025/7/5201

UDC 674.047.3, 510.644.4
DOI: 10.18799/24131830/2025/7/5201
Scientific paper

Transient processes of oscillating method of wood drying control for synthesis of algorithms for adjustment of parameters of resistive humidity sensors

V.V. Grechushnikov[✉], S.V. Prokhorov, A.A. Shilin

National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

[✉]grechvv@tpu.ru

Abstract. Relevance. The use of resistive lumber humidity sensors allows increasing the level of automation. However, the reliability of readings of such sensors should be checked, since the fault tolerance of resistive sensors is quite low. The paper deals with the urgent task of monitoring the operation, response to failures and setting up the parameters of lumber moisture sensors for the transient process of the oscillatory drying method about the occurrence of events of more reliable and fault-tolerant temperature sensors. This method generates a set of transient processes that may contain useful information, the analysis of which allows evaluating the quality of drying and the main indicators of the technological process. **Aim.** Development of an algorithm for assessing the moisture content of lumber based on the analysis of transient processes of temperature sensors to assess the correct operation of resistive sensors and adjust calibration parameters. **Methods.** Analysis of transient processes from the archive database of technological processes obtained during one and a half years of operation of the dispatching system of the main parameters for 28 complete cycles of drying of sawn timber. The analysis is based on identifying the correlation of the time of air cooling and heating when opening and closing the dampers. Under conditions of closed dampers, the possibility of determining the moisture content of sawn timber is studied based on the approximation of the dependence on the equilibrium moisture content. **Results.** The authors have developed the algorithms for automated adjustment of calibration parameters of resistive sensors relying on approximation of calculation of lumber moisture content derived from equilibrium air humidity, automatic control of lumber drying mode depending on readings of resistive humidity sensors. **Conclusions.** The analysis of the dependence of the transient cooling and heating time of the wet sensor has a weak correlation with the moisture content of the lumber and cannot provide an adequate assessment of the moisture content. Under conditions when the dampers are closed for 30–40 minutes, it is possible to observe the equilibrium moisture content of the lumber with an error of up to 2%, which allows adjusting the resistive sensors for continuous monitoring of the moisture content of the lumber. The study may be of interest to engineers and technical workers in the forestry industry involved in the creation of modern automation systems and the improvement of existing methods for controlling wood drying processes. The work can serve as a basis for developing new methods and algorithms for controlling the technological process using transient analysis to extract additional parameters.

Keywords: oscillation drying, resistive humidity sensor, transient processes, drying mode control, automation, wood equivalent moisture content

For citation: Grechushnikov V.V., Shilin A.A., Prokhorov S.V. Transient processes of oscillating method of wood drying control for synthesis of algorithms for adjustment of parameters of resistive humidity sensors. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 7, pp. 174–188. DOI: 10.18799/24131830/2025/7/5201

Введение

Древесина используется человеком практически во всех сферах деятельности. Общеизвестным является тот факт, что сухая древесина имеет более стабильные свойства (геометрия, размеры, прочность, цвет и др.), чем влажная. Для снижения влажности древесины с естественной (около 60 %) до заданной (8–20 %) существует множество различных технологий сушки пиломатериалов (ПМ) [1]:

- естественная – самый старинный из методов сушки. ПМ укладываются на открытом воздухе,

защищенные от дождя и прямых солнечных лучей. Сушка происходит за счет естественной циркуляции воздуха и солнечного света. Этот метод экономичен, но требует много времени и зависит от погодных условий;

- конвекционная – использует специальные сушильные камеры с контролируемыми условиями (температура, влажность, скорость воздуха). ПМ помещаются в камеру, где горячий воздух циркулирует, ускоряя процесс сушки. Это более быстрый и контролируемый метод по сравнению с естественной сушкой;

- инфракрасная – в этом методе используются инфракрасные лампы, которые нагревают поверхность ПМ, вызывая испарение влаги. Этот способ позволяет сократить время сушки и сохранить качество древесины;
- вакуумная – ПМ помещаются в вакуумную камеру, где давление снижается, что позволяет воде испаряться при низких температурах. Это помогает избежать повреждений древесины и сохранить ее свойства;
- СВЧ (микроволновая) – использует микроволновое излучение для нагрева древесины и испарения влаги. Этот метод позволяет быстро сушить ПМ, но требует специализированного оборудования;
- конденсационная – тепловые насосы перекачивают тепло из окружающей среды для нагрева воздуха в сушильной камере. Это энергоэффективный метод, который позволяет контролировать уровень влажности и температуры.

Каждая из технологий имеет свои преимущества и недостатки, и выбор зависит от конкретных условий и требований к конечному продукту. Перечисленные традиционные методы сушки, как правило, основываются на поддержании стационарных параметров сушильного агента – температуры, влажности и скорости движения воздуха. Наибольшее распространение в промышленности получил метод конвекционной сушки, для которого формируется карта поддержания основных технологических параметров на всех этапах техпроцесса. Для снятия напряженности на всех этапах сушки применяется так называемое пропаривание в течение 2–4 часов для снятия напряженности внутренних слоев древесины [1–3]. Однако такой подход не всегда оптимален, поскольку не учитывает изменяющееся состояние древесины в процессе сушки.

В качестве альтернативы пропариванию в работах [1, 4–6] рассматриваются осциллирующие методы сушки (ОМС), предполагающие динамическое и периодическое изменение технологических параметров, что позволяет адаптировать процесс к текущим потребностям материала. Этот метод сочетает в себе элементы естественной, традиционной конвективной сушки и современных технологий управления воздухом. При использовании ОМС циклически изменяются величины температуры и влажности сушильного агента в заданном диапазоне, а также направление потока воздуха. Частота и амплитуда этих колебаний подбираются таким образом, чтобы оптимизировать скорость сушки, минимизировать дефекты и улучшить качество конечного продукта.

Преимущества ОМС проявляются в нескольких аспектах. Во-первых, периодическое изменение параметров способствует более равномерному рас-

пределению влаги в древесине, снижая градиент влажности между поверхностью и сердцевиной. Переменный поток воздуха позволяет улучшить распределение тепла и влаги по всей сушильной камере, а также помогает избежать образования «мертвых зон», где воздух может застаиваться и не проходить через ПМ. Это обеспечивает более равномерную сушку, уменьшает риск растрескивания и коробления.

Во-вторых, осциллирующий режим может ускорить процесс сушки, особенно на начальных этапах, когда удаление свободной влаги происходит наиболее интенсивно [4].

В-третьих, такой метод позволяет снизить энергопотребление, поскольку не требует поддержания постоянных высоких температур [5].

В качестве недостатка этого метода указывается сложность алгоритма и методики использования показаний техпроцесса в реальном времени, поскольку процессы температуры и влажности в камере периодически меняются. Однако наличие большого числа информативных переходных процессов (ПП) можно определять как достоинство ОМС, так как активно меняющиеся переходные процессы могут содержать дополнительную информацию о процессе. Современные SCADA системы управления техпроцессом позволяют наблюдать и сохранять ПП всех этапов для дальнейшего анализа как в реальном времени, так и по окончании процесса.

В данной статье рассматриваются ПП (рис. 1), представляющие собой зависимости изменения температур влажного (T_w) и сухих (T_{in} , T_d) датчиков температуры, сигналов направления вращения вентиляторов ($Vent$), положения заслонки ($Zasl$) от времени начала сушки ПМ. С помощью данных термометров можно с высокой точностью определять величину влажности в сушильной камере (H), а по ней, в свою очередь, можно судить о величине влажности ПМ (Wood Equivalent Moisture Content) (EMC) [7].

Основным недостатком использования рассматриваемых датчиков является возможность высыхания влажного датчика температуры. Если влажный датчик высох, то его показания начинают приближаться к показаниям сухого датчика и как следствие, оцененная относительная влажность начинает увеличиваться. При полном пересыхании показания будут совпадать с показаниями сухого датчика, и измеренная влажность будет равняться 100 %. Пересыхание датчика с большой вероятностью приведет к избыточной сушке древесины, вследствие чего проявятся такие дефекты, как растрескивание и деформация, которые приведут к порче ПМ. Этот недостаток решается своевременным контролем количества воды и установкой ем-

костей большого объема вне сушильной камеры с возможностью их автоматического пополнения по критерию уровня жидкости.

Другим методом определения величины влажности является использование специальных UGL-датчиков (датчиков влажности). В [8, 9] отмечено, что UGL-датчики имеют несколько существенных недостатков. Одним из них является большая инерционность измерений и большая погрешность измерений при высокой влажности воздуха. Из-за этих особенностей автоматика сушильной камеры может неправильно настраивать режим сушки первой ступени, определяющей вероятность появления дефектов, и неверно принимать решение о переходе ко второму этапу, что в итоге может привести к порче ПМ.

Также широкое распространение в камерах сушки ПМ получили резистивные датчики влажности (РДВ). В [10, 11] указано, что из-за крайне агрессивной среды эксплуатации показания датчиков могут отклоняться от фактических значений влажности из-за деградации сенсорного элемента. Эта деградация может быть вызвана различными факторами: окислением электродов, изменением структуры полимерного материала, воздействием экстремальных температур и влаги.

В [12] для устранения помехи от факторов окружающей среды и обеспечения устойчивого высокоточного измерения влажности пиломатериалов в режиме реального времени при измерении последней методом измерения сопротивления авторами предложено использование нейронной сети.

Но даже если снизить величину помех от факторов внешней среды до нуля, показания РДВ могут быть искажены. В литературе [1–3] рассматриваются следующие факторы, влияющие на измеренное омическое сопротивление:

- загрязнение поверхности датчика пылью или древесной стружкой, в результате чего увеличивается сопротивление между электродами;
- подвод иглами датчика лишнего тепла к древесине в местах заглубления. Из-за подсушки древесины в этих местах контакт между датчиком и материалом нарушается;
- глубина и место фиксации датчика. Если датчик установлен в смолу или сучек измеренная величина влажности будет сильно отличаться от реальной.

Для поддержания точности РДВ необходима регулярная тарировка. Тарировка – это процесс корректировки показаний датчика путем сравнения их с известными эталонными значениями влажности. Существует несколько методов тарировки, включая использование камер климатического контроля, солевых растворов с известной относительной влажностью и специализированных эталонных вла-

гомеров. Процесс тарировки обычно включает в себя помещение датчика в среду с известной влажностью и сравнение его показаний с эталонным значением. Если показания датчика отклоняются от эталона, необходимо внести корректировку, обычно путем изменения параметров в программном обеспечении или аппаратной части измерительного прибора.

Вышеописанные методы тарировки можно использовать только до начала или после окончания процесса сушки, но, как было описано, измеренное омическое сопротивление изменяется в процессе сушки, следовательно, тарировка должна происходить в режиме реального времени.

В данной статье рассматривается *гипотеза* о том, что переходные процессы осциллирующего метода сушки содержат достаточную информацию, основываясь на которой можно провести тарирование омических датчиков влажности древесины, а также выявить их некорректную работу. Данная гипотеза основывается на том, что влажность связана и изменяется по тем же законам, что и относительная влажность сушильного агента [5, 7]. В свою очередь, равновесная влажность древесины соответствует текущему состоянию сушильного агента, т. е. напрямую зависит от температуры (T , °C) и относительной влажности воздуха (H) в камере, что подтверждается диаграммой равновесной влажности Н.Н. Чулинского, уравнением Хейлвуда–Хорробина [13] и информацией, изложенной в [3, 8, 14].

Для принятия решения о переходе с одного режима сушки на другой необходимо с достаточной точностью знать величину EMC [15]. Для этого обслуживающему персоналу приходится периодически измерять эту величину дополнительными переносными средствами измерения непосредственно в камере. Данная процедура не входит в контур автоматического управления и может быть игнорирована или выполнена халатно в силу неблагоприятных условий в камере. Сама процедура ручных замеров не влияет на качество высушенного материала, но позволяет вовремя принять вполне осмысленные решения согласно технологической карте процесса сушки.

В результате чего можно *сделать вывод* о том, что использование тарировки позволит максимально исключить человеческий фактор и в автоматическом режиме правильно выполнять переход с одного режима сушки к другому.

Задачами данного исследования являются:

- анализ процессов нагрева и остывания датчиков с целью обнаружения корреляции с равновесной влажностью;
- решение проблемы оценки влажности пиломатериалов по резистивным датчикам влажности

методом анализа переходных процессов при осциллирующем методе сушки;

- подтверждение гипотезы о возможности подстройки параметров тарирования;
- разработка алгоритмов определения условий отказа датчиков и автоматизированной подстройки параметров тарирования РДВ;
- формирование алгоритмов автоматического перехода между этапами сушки.

Методы и подходы

Как было отмечено выше, осциллирующие режимы сушки имеют ряд определенных достоинств. Одним из достоинств является тот факт, что в этом методе параметры режима изменяются периодически и по определенным законам, в результате чего можно наблюдать определенные ПП, которые можно оценивать и анализировать. В данной статье рассматривается сушка, в которой режим работы сушильной камеры поддерживается при помощи регулировки времени открытия и закрытия клапанов, через которые выбрасывается влажный воздух из камеры. Данный режим можно использовать либо в течение всего времени сушки, либо периодически (раз в 12 часов) для получения информации и принятия решений о переходе на следующую ступень сушки.

На рис. 1 представлен полный график ОМС пиломатериалов, полученный в процессе работы сушильной камеры в г. Томске. Продолжительность всей сушки составляет 13500 минут. Промежуток

времени с 320 по 1895 минут представлен предварительным этапом прогрева. Первому этапу сушки соответствует диапазон времен с 1896 по 1680, второму – 1681–8735, третьему – 8736–12154, этапу остывания – 12155–13500.

Конструктивной особенностью данной камеры является наличие одного влажного и двух сухих датчиков температуры. Как можно заметить из рис. 2, иллюстрирующего промежуток времени, относящийся к первому этапу сушки ПМ, температуры этих датчиков (T_d , синий график, и T_{in} , голубой график) неодинаковы. Это связано с пространственным расположением датчиков внутри сушильной камеры.

Датчик T_d расположен возле влажного датчика T_w , а T_{in} – на противоположном конце камеры, ближе к калориферам. В зависимости от направления вращения вентиляторов циркуляция воздуха в камере имеет прямое и обратное направления. В первом случае воздух проходит через штабель → датчик T_w → датчик T_d → датчик T_{in} → калорифер, в другом – наоборот. В результате при работе в прямом направлении измеренная величина будет примерно одинаковой, а при обратном возле теплообменника влажность будет ниже, в то время как после прохождения через штабель доска отдаст влагу, и разница показаний датчиков увеличится ($T_{in}-T_d > 0$). В сочетании с предложениями, изложенными в [16], данный эффект позволит снизить время реакции автоматики на нештатную работу вентиляции.

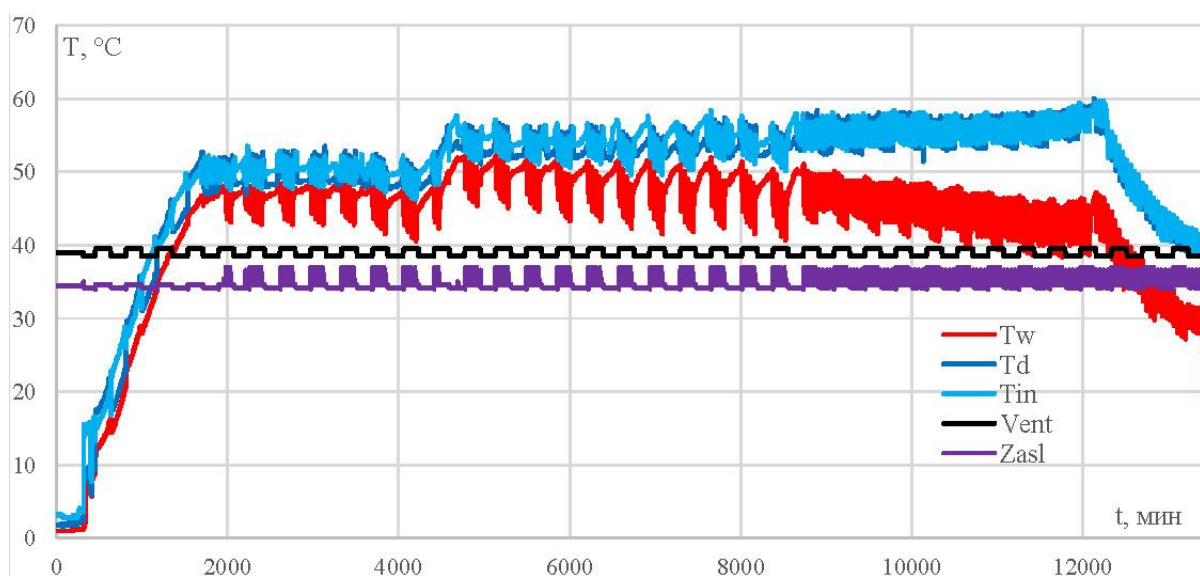


Рис. 1. График сушки пиломатериала осциллирующим методом: T_w – температура влажного датчика; T_d – температура сухого датчика, расположенного возле влажного; T_{in} – температура сухого датчика, расположенного на противоположном конце камеры ближе к калориферам; Vent – направления вращения вентиляторов; Zasl – положение заслонки сброса воздуха

Fig. 1. Schedule of drying sawn timber using oscillating method: T_w – wet temperature sensor; T_d – temperature of a dry sensor located near a wet one; T_{in} – temperature of a dry sensor located at the opposite end of the chamber closer to the heaters; Vent – fan rotation directions; Zasl – air bleed flap position

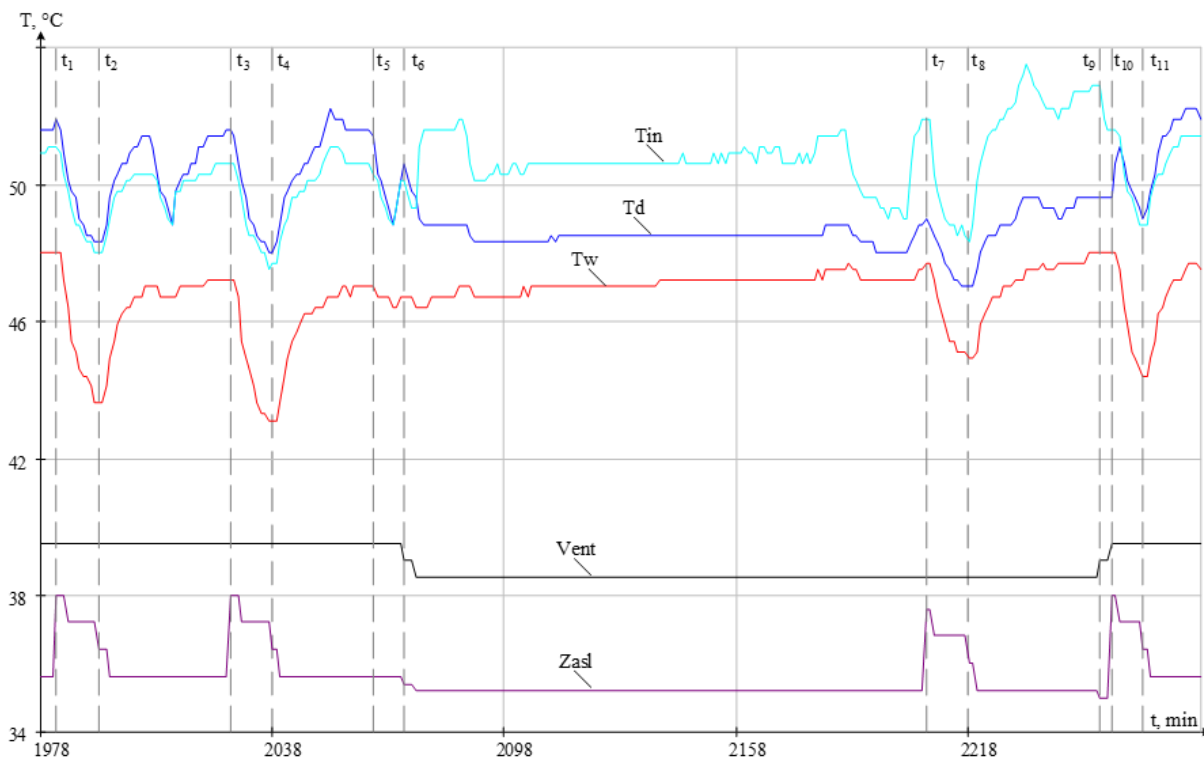


Рис. 2. Переходные процессы осциллирующего метода сушки
Fig. 2. Transient processes of oscillation drying

На рис. 2 интервалам времени t_1-t_2 , t_3-t_4 , t_7-t_8 , $t_{10}-t_{11}$ соответствует ПП остывания, при этом заслонка открывается, влага из сушильной камеры выбрасывается в окружающую среду, температуры датчиков снижаются. ПП нагрева представлен интервалами времени t_2-t_3 , t_4-t_5 , t_8-t_9 . В данном режиме заслонка закрыта, древесина нагревается и отдает влагу в камеру, температура датчиков увеличивается. На интервале времени t_6-t_7 происходит процесс перемешивания. Заслонка закрыта, изменяется направление циркуляции воздуха, происходит перемешивание объема воздуха, достигается равновесная влажность, температура датчиков увеличивается. В моменты времени t_6 и t_9 вентиляторы меняют направление своего вращения с прямого на обратный соответственно.

В процессе анализа ПП при осциллирующем методе сушки было замечено, что величина температуры при нагреве и остывании изменяется по экспоненциальным законам, которые можно описать формулами (1), (2) соответственно:

$$Y_{\text{нагрев}}(t) = k_{1\text{нагр}} \left(1 - e^{-\frac{t-k_{2\text{нагр}}}{\tau_{\text{нагр}}}} \right), \quad (1)$$

$$Y_{\text{остывание}}(t) = k_{1\text{ост}} + (T_{0\text{ост}} - k_{1\text{ост}}) e^{-\frac{t-k_{2\text{ост}}}{\tau_{\text{ост}}}}. \quad (2)$$

Решая вариационную задачу методом Левинберга–Марквардта для влажного датчика (T_w) на про-

межутке времени t_1-t_2 , используя формулу (2), получаем результаты, сведенные в табл. 1, для промежутка времени t_2-t_3 и формулы (1) – табл. 2. Как видно из табл. 1, 2, коэффициент детерминации имеет значения больше 98,5 %. Это означает, что функциональные зависимости определены верно.

На рис. 3 приведены зависимости для решения с $R^2=99,5\%$ (решение 1, табл. 1) и $R^2=98,4\%$ (решение 3, табл. 2). Как видно из графика, присутствуют некоторые отклонения между полученными зависимостями остывания и нагрева (светло- и темно-зеленый графики) и величиной температуры, измеренной влажным датчиком (красный график, T_w). Отклонения могут быть объяснены погрешностями измерений датчиков температуры и высокой инерционностью датчика T_w .

Анализируя изменение показаний сухих датчиков T_d и T_{in} , можно заметить, что ПП остывания также описываются экспоненциальной зависимостью (промежуток времени t_1-t_2 и др., рис. 1). Однако на промежутке времени t_2-t_3 (рис. 1) (переходный процесс нагрева влажного датчика), наблюдается два ПП остывания с последующими нагреваниями датчиков T_d и T_{in} . При этом с течением времени сушки амплитуда данных ПП снижается, пока на третьем этапе сушки не исчезает совсем. Данный эффект предлагается рассмотреть как одну из составляющих, расширяющих слой признаков нейронной сети, предложенной в [17].

Таблица 1. Результаты решения вариационной задачи ПП остывания

Table 1. Results of the solution of the variational problem of transient cooling processes

Параметр Parameter		Решение/Solution			
		1	2	3	4
Время начала аппроксимации, мин Approximation start time, min	t_{start}	1983	1983	1984	1984
Время конца аппроксимации, мин Approximation end time, min	t_{end}	1994	1993	1994	1993
Начальная температура, °C Initial temperature, °C	$T_{\text{ост}}$	48	48	47,2	47,2
Коэффициент остывания 1, °C Cooling coefficient 1, °C	$k_{1\text{ост}}$	43,184	43,148	43,31	43,311
Коэффициент остывания 2, мин Cooling coefficient 2, °C	$k_{2\text{ост}}$	1983,07	1983,07	1983,98	1983,98
Постоянная времени остывания, мин Cooling time constant, min	$\tau_{\text{ост}}$	4,314	4,38	3,863	3,86
Коэффициент детерминации Coefficient of determination	R^2	0,995	0,994	0,992	0,991

При этом стоит учитывать, что в табл. 1, 2 величина R^2 определяется для промежутка аппроксимации, при рассмотрении определенных отрезков времени результат будет отличаться. Рассчитаем коэффициент детерминации для трех промежутков решений из табл. 2 и сведем их в табл. 3.

Таблица 2. Результаты решения вариационной задачи ПП нагрева

Table 2. Results of the solution of the variational problem of transient heating processes

Параметр/Parameter		Решение/Solution		
		1	2	3
Время начала аппроксимации, мин Approximation start time, min	t_{start}	1994	1994	1994
Время конца аппроксимации, мин Approximation end time, min	t_{end}	2008	2020	2028
Начальная температура, °C Initial temperature, °C	$T_{\text{нагр}}$	43,6	43,6	43,6
Коэффициент остывания 1, °C Cooling coefficient 1, °C	$k_{1\text{нагр}}$	47,135	46,942	47,042
Коэффициент остывания 2, мин Cooling coefficient 2, °C	$k_{2\text{нагр}}$	1983,86	1985,07	1984,19
Постоянная времени остывания, мин Cooling time constant, min	$\tau_{\text{нагр}}$	3,964	3,45	3,8
Коэффициент детерминации Coefficient of determination	R^2	0,996	0,989	0,984

Таблица 3. Величина R^2 для различных промежутков времени аппроксимации

Table 3. R^2 value for different approximation time intervals

Промежуток времени, мин. Time interval, min.	R^2		
	Решение/Solution		
	1	2	3
1994–2008	0,996	0,996	0,995
1994–2020	0,986	0,988	0,989
1994–2028	0,983	0,984	0,983

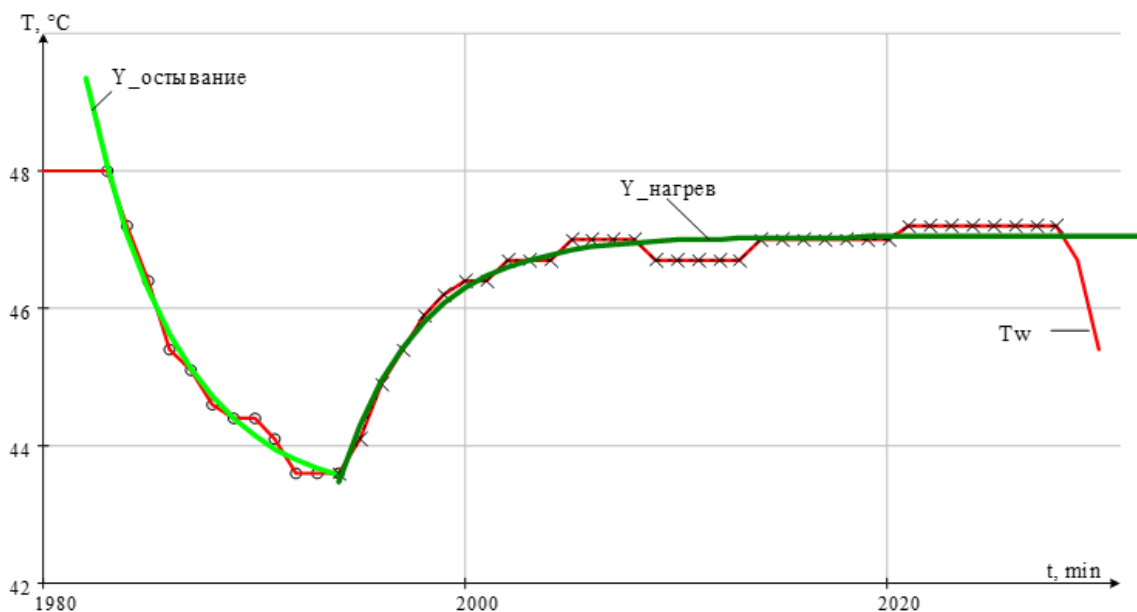


Рис. 3. Графики переходных процессов и их аппроксимаций
Fig. 3. Graphs of transient processes and their approximations

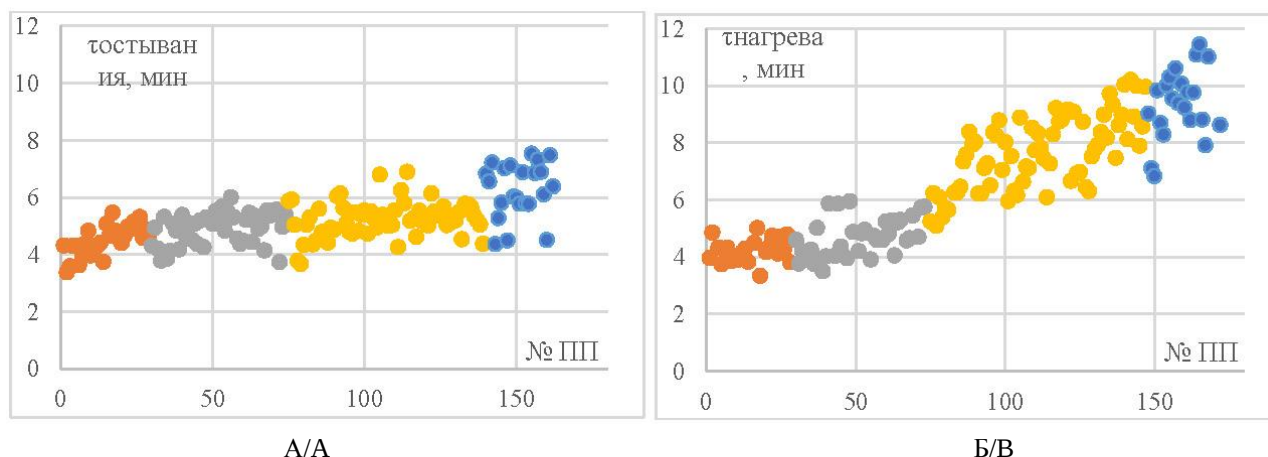


Рис. 4. Постоянные времени влажного датчика: А – ПП остывания, Б – нагрева. Оранжевые точки – первый этап сушки ПМ, серые – второй, желтые – третий, синие – остывание

Fig. 4. Time constants of the wet sensor: А – transient cooling process, В – heating. Orange dots – first stage of lumber drying, grey – second, yellow – third, blue – cooling

Результаты исследования и их обсуждение

На основе проведенного анализа ПП остывания и нагрева влажного датчика можно сделать вывод о том, что функциональные зависимости (1) и (2) и постоянные времени (τ , мин) были определены верно, поскольку величина R^2 превышает 98,3 % на всех временных интервалах. Исходя из полученных данных (рис. 4), видно, что постоянная времени влажного датчика имеет большую дисперсию и во время сушки увеличивается. Дальнейший качественный и количественный анализ корреляций величин τ и ЕМС следует вести после определения постоянных времени нагрева и остывания сухих датчиков. На данном этапе полученные данные нельзя напрямую использовать для определения влажности древесины, требуются дополнительные исследования, целесообразным является применение технологий искусственного интеллекта для поиска возможных скрытых корреляций.

Рассмотрим подробнее зависимость влажности древесины от параметров окружающей среды. Данная зависимость может быть описана уравнением Хейлвуда–Хорробина (формула (3)) и поверхностями, представленными на рис. 5.

$$EMC(T, H) = \frac{1800}{W} \left(\frac{KH}{1-KH} + \frac{K_1KH + 2K_2K_1K^2H^2}{1 + K_1KH + K_2K_1K^2H^2} \right), \quad (3)$$

где

$$\begin{aligned} W &= 349 + 1,29 \cdot T + 0,0135 \cdot T^2, \\ K &= 0,805 + 7,36 \cdot 10^{-4} \cdot T - 2,73 \cdot 10^{-6} \cdot T^2, \\ K_1 &= 6,27 + 9,38 \cdot 10^{-3} \cdot T - 3,03 \cdot 10^{-4} \cdot T^2, \\ K_2 &= 1,91 + 4,07 \cdot 10^{-2} \cdot T - 2,93 \cdot 10^{-4} \cdot T^2. \end{aligned}$$

Несмотря на то, что уравнение Хейлвуда–Хорробина получило довольно обширную критику [18, 19], в частности из-за того, что коэффициенты не учитывают типы пород деревьев и их механические свойства, данное уравнение с достаточной точностью соответствует диаграмме Н.Н. Чулицкого (рис. 5, А) и имеет эмпирическое соответствие данным, полученным в процессе ОМС в рассматриваемой сушильной камере (рис. 7, Б).

На рис. 6 представлена зависимость величины психрометрической разницы (ΔT_1 , °С), равной разности мгновенных величин показаний сухого (T_d) и влажного (T_w) датчиков температуры. По величине среднего установившегося значения ΔT_1 для каждого ПП нагрева (на графике не отмечены) можно судить о текущем режиме и параметрах сушильного агента внутри камеры сушки. Как видно из графика, данная величина в полной мере соответствует необходимым диапазонам для каждого из режимов, вследствие чего достигается бездефектный результат сушки ПМ. Замечено, что величина ΔT_1 также изменяется по экспоненциальному закону, следовательно, для нее также можно определить постоянную времени нагрева и остывания. Проверка наличия корреляции постоянных времени с влажностью ПМ в данной работе не проводилась.

Нижние огибающие графика, получаемые при закрытии клапана сброса воздуха и изменении вращения вентиляторов, в сочетании с диаграммой равновесной влажности в координатах T от ΔT [20] (рис. 7, А) позволяют получить представление о величине ЕМС. В данном случае это будет величина обобщенной влажности всех досок в сушильной камере. На рис. 6 точками отмечены средние величины ΔT_1 ПП перемешивания за промежуток в 60 минут для 1 и 2 режимов и 35 минут для третьего

режима. Каждой точке соответствует величина ΔT_1 , момент времени $t_{пп}$ и номер ПП (ппп). Для 1-го и 2-го режимов средняя установившаяся величина может быть описана полиномом второго порядка, а для третьего режима – линейной функцией. Как видно из графика, величина разности температур влажного и сухого датчика с течением времени увеличивается, что говорит о процессе высыхания ПМ. Данный процесс изображен красной линией на рис. 7.

По рис. 7 хорошо видно, что при заданной температуре режима 2 в 55 °C по разности показаний влажного и сухого датчиков мы можем определить величину EMC только начиная с 26 %. До этой величины психрометрическая разница должна быть равна нулю, что соответствует 100 % влажности в сушильной камере. Но на графике 6 видно, что

данная величина отлична от нуля вследствие погрешности датчиков температуры. Основываясь на этом факте, среднюю величину $\Delta T_1 = 1,2$ за период перемешивания, предшествующий первому этапу сушки ПМ (промежуток времени 1831–1891 мин.), примем как тарировочную для датчиков температуры, поскольку в начале сушки влажность доски может составлять 30–80 %, что существенно больше возможного диапазона определения по психрометрической влажности. Из вышесказанного следует, что по окончании сушки ПМ для 17-ти точек ПП можно определить величину EMC(T,H). Таким образом, по величине ΔT_1 можно с высокой точностью судить о величине влажности ПМ и принимать решение о переходе со второго режима сушки на третий, по критерию достижения EMC(T,H)=15 %.

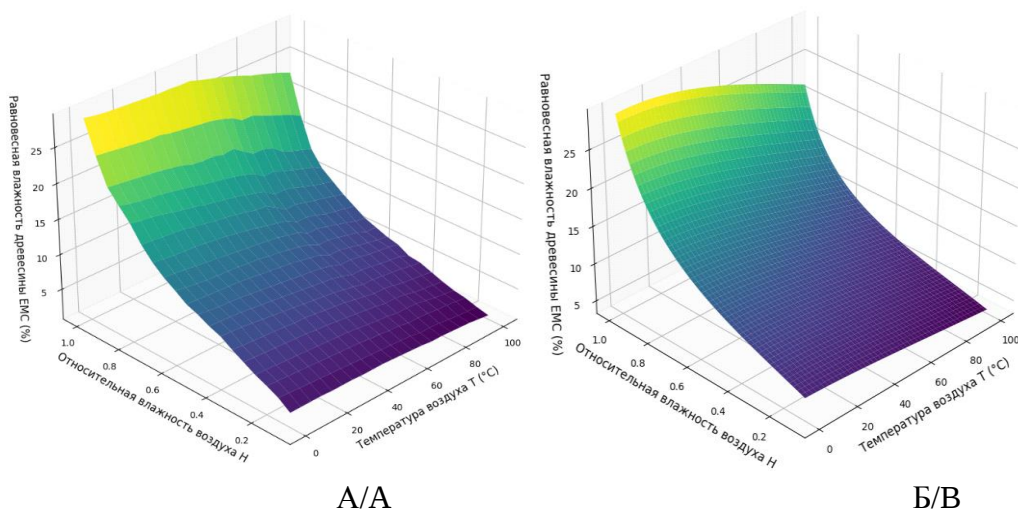


Рис. 5. Поверхности равновесной влажности древесины (EMC, %) в зависимости от температуры (T , °C) и относительной влажности воздуха (H , о.е.) на основе: А) диаграмм равновесной влажности Н.Н. Чулицкого; Б) уравнения Хейлвуда–Хорробина

Fig. 5. Equilibrium moisture content surfaces of wood (EMC, %) depending on temperature (T , °C) and relative air humidity (H , o.e.) based on: А) equilibrium moisture content diagrams by N.N. Chulitsky; Б) the Hailwood–Horrobin equation

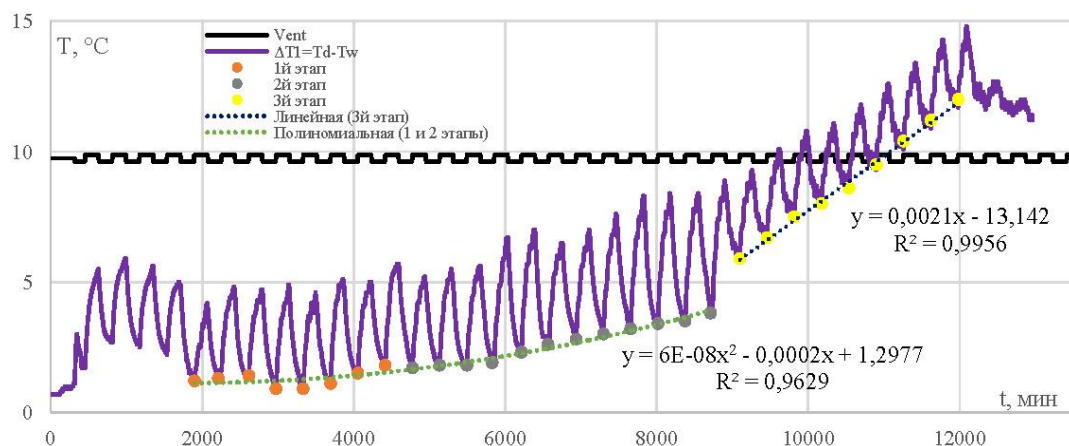


Рис. 6. Изменение величины психрометрической влажности в процессе сушки

Fig. 6. Change in the value of psychrometric humidity during drying

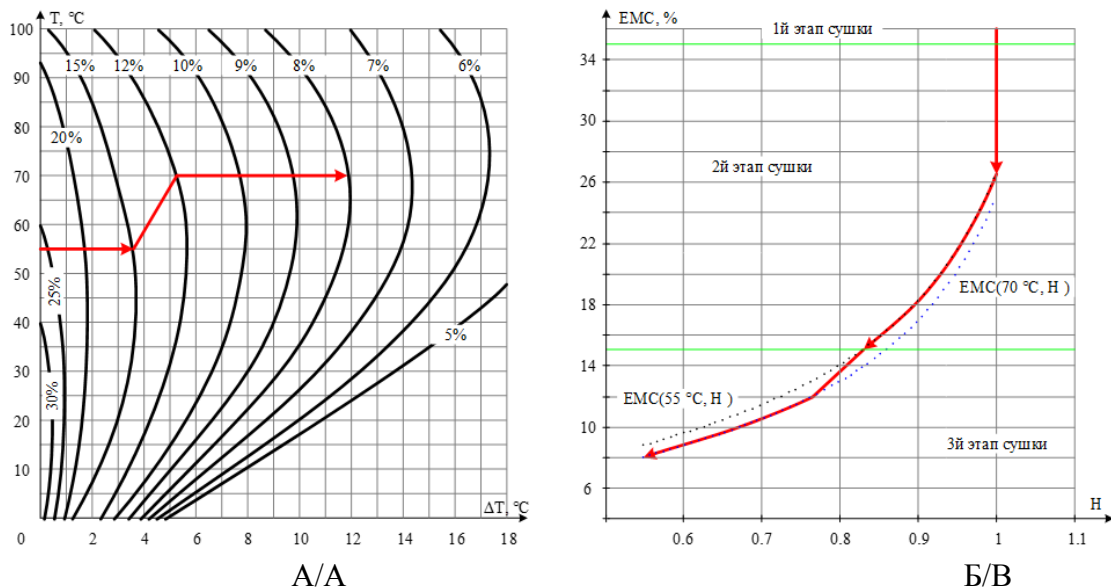


Рис. 7. Равновесная влажность: А) диаграмма; Б) по уравнению Хейлвуда–Хорробина
Fig. 7. Equilibrium moisture content: А) diagram; Б) according to the Hailwood–Horrobin equation

Величина ΔT_1 на втором и третьем этапах сушки также используется для тарирования резистивных датчиков влажности с целью их точной подстройки под текущие условия и определения факта их отказа.

Для описания зависимости равновесной влажности древесины от измеренного сопротивления (R) РДВ используют эмпирические формулы, поскольку связь между этими величинами нелинейная и зависит от породы древесины, температуры, а также других факторов (например, наличия солей или пропитки) [21–24]. На практике наиболее часто используют логарифмическую зависимость (4) [22, 25, 26]:

$$EMC(R) = a_0 + a_1 \lg(R). \quad (4)$$

Авторами предлагается следующий алгоритм автоматизированной подстройки параметров тарирования резистивных датчиков на основе аппроксимации вычисления влажности пиломатериала по равновесной влажности и температуре воздуха по окончании сушки пиломатериалов (рис. 8). В алгоритме используются следующие обозначения:

- $N_{дат\sum}$ – суммарное количество РДВ, установленных в сушильной камере;
- $N_{пп\sum}$ – количество ПП прогрева сушки, для которых по (3) можно определить величину $EMC(T, H)$;
- $N_{хор}$ – количество составленных уравнений системы (5);
- k – степень «доверия» новым данным;
- nd – номер датчика;
- $ппп$ – номер ПП;
- a_0 и a_1 – коэффициенты, формула (4);
- EMC_{R_min} EMC_{R_max} – доверительный диапазон измерений.

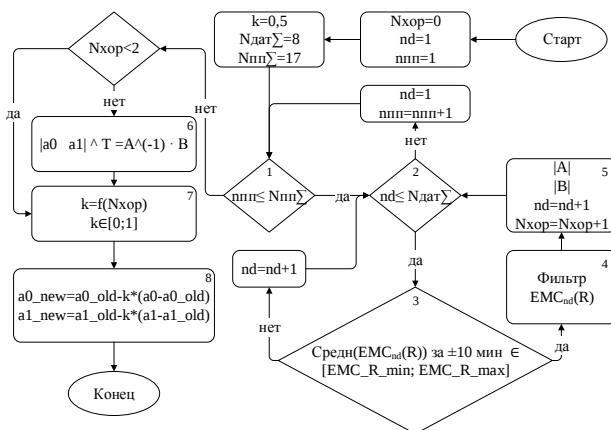


Рис. 8. Алгоритм автоматизированной подстройки параметров тарирования РДВ

Fig. 8. Algorithm for automated adjustment of calibration parameters of resistive humidity sensors

В процессе работы алгоритма при помощи блока – 1 последовательно проверяются точки ПП, для данной сушки их количество равно 17, в которых по величине температуры и влажности воздуха можно вычислить $EMC(T, H)$. Блок 2 отвечает за последовательную проверку каждого из установленных РДВ в камере (8 шт.). В блоке 3 среднее показание каждого датчика $EMC(R)$ за 10 минут до и после $t_{пп}$ проверяется на соответствие коридору значений $EMC(T, H)$, это необходимо для того, чтобы определить, что в течение этого времени датчик находился в работе и его показаниям в момент времени $t_{пп}$ можно доверять. Блок 4 предусмотрен для того, чтобы снизить величину шума в измерениях и исключить случайные значения. В блоке 5

формируются матрицы А и В. Матрица А формируется на основании уравнений (5) и является матрицей коэффициентов, матрица В – значений системы (уравнение (6)). В связи с тем, что количество неизвестных коэффициентов a может оказаться сильно меньше числа уравнений, для решения вычисляется псевдообратная матрица по методу Гревилля, и затем рассчитываются коэффициенты a_0 и a_1 , за данные вычисления отвечает блок 6.

$$EMC(T_1, H_1) = a_0 + a_1 \lg(R_1),$$

$$EMC(T_2, H_2) = a_0 + a_1 \lg(R_2),$$

...

$$EMC(T_{N_{\text{хор}}}, H_{N_{\text{хор}}}) = a_0 + a_1 \lg(R_{N_{\text{хор}}}), \quad (5)$$

$$A = \begin{bmatrix} 1 & \lg(R_1) \\ 1 & \lg(R_2) \\ \dots & \dots \\ 1 & \lg(R_{N_{\text{хор}}}) \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} EMC(T_1, H_1) \\ EMC(T_2, H_2) \\ \dots \\ EMC(T_{N_{\text{хор}}}, H_{N_{\text{хор}}}) \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Величина $N_{\text{хор}}$ изменяется в пределах от 0 до 136 (8 датчиков, 17 точек ПП). При этом коэффициент k (уравнение (7)), показывает, насколько мы «доверяем» новым полученным данным и зависит от количества успешных измерений (блок 7). Чем больше будет величина $N_{\text{хор}}$, тем ближе к единице будет коэффициент k . В случае, если все датчики перестали работать до достижения влажности в $(26 \pm 8) \%$, или уравнений было составлено меньше двух, $N_{\text{хор}}$ и k будут равняться нулю, а коэффициенты a_0 и a_1 останутся прежними (блок 8).

$$k(N_{\text{хор}}) = \frac{N_{\text{хор}}}{136}. \quad (7)$$

В результате использования данного алгоритма в процессе четырех полных циклов сушки были получены коэффициенты a_0 и a_1 (табл. 4). На рис. 9 показано, как изменяются показания РДВ (W_{R1} , W_{R2}) в процессе сушки. Датчики были настроены согласно результатам третьей сушки. Анализируя полученные зависимости (рис. 9), можно сделать вывод о том, что датчик W_{R1} периодически терял контакт из-за его плохого крепления в древесине, т. к. его показания в некоторые моменты времени резко снижались и затем восстанавливались, пока не стали равны нулю, в отличие от показаний второго датчика. При возникновении замыкания в датчике измеряемое сопротивление упадет до нуля, а величина $EMC(R)$ значительно увеличится. Для исключения влияния этих эффектов на коэффициенты a_0 и a_1 в алгоритме используются блоки 3 и 4. При этом стоит отметить, что полученные коэффициенты справедливы для рассматриваемой камеры в г. Томске, при последовательной сушке Сибирского Кедра размерами $50 \times 100 \times 6000$ мм.

Таблица 4. Коэффициенты тарирования резистивных датчиков

Table 4. Calibration factors for resistive sensors

№ сушки/Drying no.	a_0	a_1
1	50	-4,5
2	48,8	-4,3
3	48,7	-4,3
4	48,7	-4,3

Также из рис. 9 видно, что благодаря тарированию удалось достичь точности измерения $EMC(R)$ на 2-м и 3-м этапах сушки в коридоре значений $(EMC(T, H) \pm 4) \%$. На этапе прогрева показания датчиков могут сильно разниться. Это связано не только с местом и качеством их крепления, но также с исходным состоянием древесины. Например, если сушка происходит зимой и ПМ хранились замороженными на улице. В этом случае показания датчиков могут быть нулевыми, пока ПМ не оттают. На первом этапе сушки показания первого датчика находятся в коридоре аппроксимированных значений $(EMC(T, H) \pm 8) \%$, в то время как значения второго с течением времени приближаются к нему. Это может быть объяснено тем, что формула (4) справедлива для диапазона влажности примерно от 7 до 35 %, и при более высокой влажности (выше точки насыщения волокон) точность падает. Несмотря на это полученной точности достаточно для того, чтобы, опираясь на средние показания тарированных по предыдущей сушке ПМ такого же типа работающих датчиков, осуществить критически важный для итогового качества ПМ переход с первого на второй режим сушки.

Авторами предлагается следующий алгоритм автоматического управления режимом сушки пиломатериалов на основе показаний резистивных датчиков влажности (рис. 10). В данном алгоритме добавляются следующие обозначения:

- $N_{\text{этапа}}$ – номер этапа сушки;
- N_x – количество датчиков, показаниям которых можно доверять;
- Bad – число раз, когда в работе не осталось РДВ;
- MC – средняя величина $EMC(R)$ всех работающих датчиков в текущий момент времени;
- W – матрица для вычисления величины MC ;
- i – количество элементов матрицы W ;
- $t_{\text{старт}}$ – время начала действия алгоритма после старта сушки.

Как отмечалось выше, РДВ необходимо определенное количество времени, чтобы их показания стали попадать в доверительный интервал. Для осуществления выдержки времени в алгоритм введено условие (блок 1), определяющее момент начала измерения текущей влажности ПМ в сушильной камере. Время начала действия алгоритма было определено на основании анализа предыдущих полных циклов сушки пиломатериала и составляет 2880 минут с момента начала сушки ПМ.

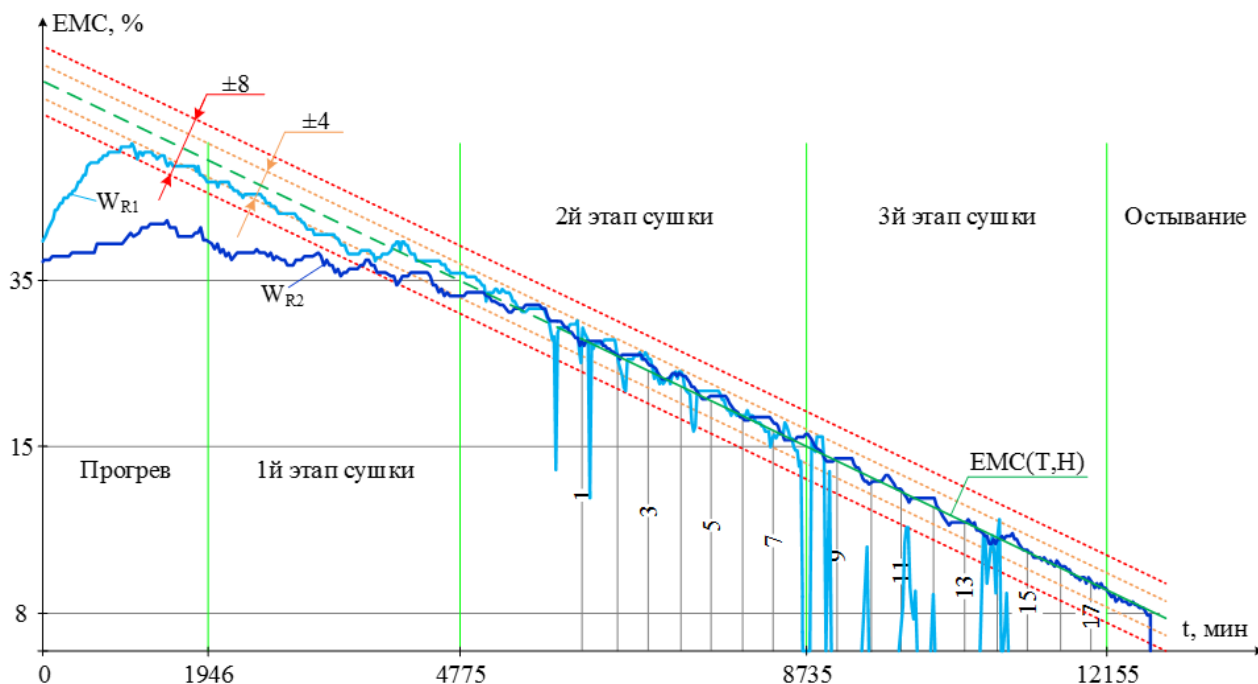


Рис. 9. Сушка № 3, показания $EMC(R)$ РДВ
Fig. 9. Drying no. 3, $EMC(R)$ readings of the resistive humidity sensor

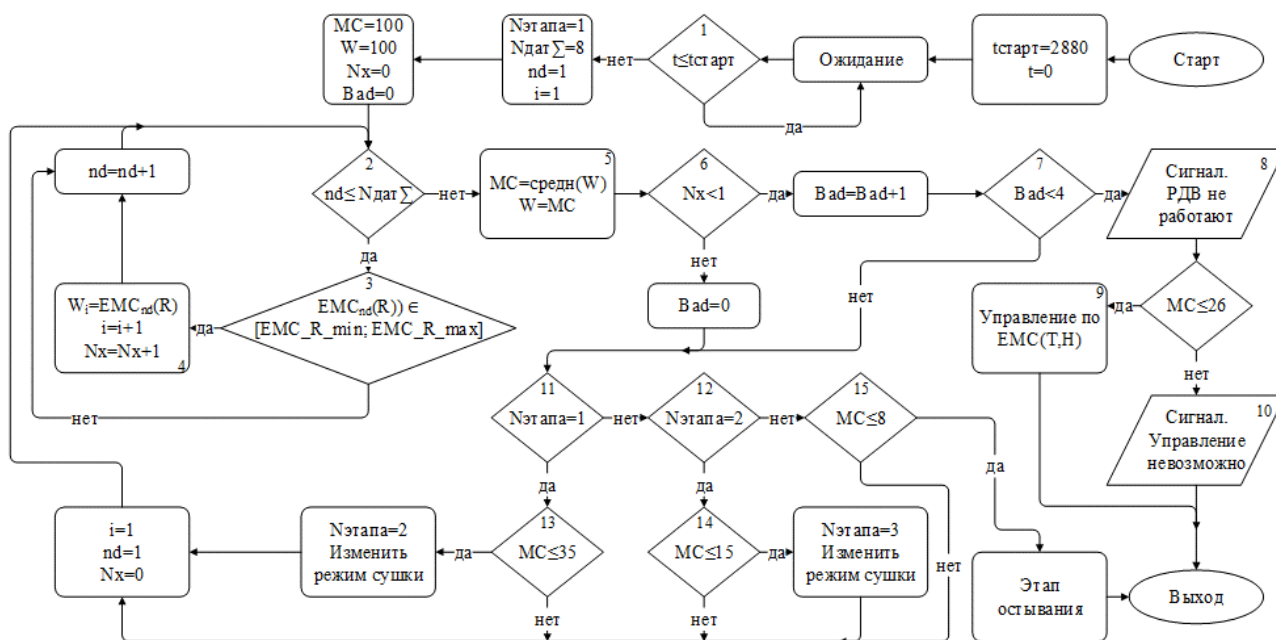


Рис. 10. Алгоритм автоматического управления режимом сушки пиломатериалов
Fig. 10. Automatic control algorithm for drying lumber

Перед принятием решения о том, можно ли переходить на следующий режим сушки или нет, необходимо проверить датчики на работоспособность, это осуществляется блоками 2 и 3. Блок 2, так же, как и в первом алгоритме, отвечает за последовательную проверку каждого из установленных РДВ в камере. Блок 3 проверяет, принадлежит ли текущая измеренная дат-

чиком величина влажности доверительному интервалу. Если принадлежит, то данное значение записывается в матрицу W , если нет – проверяются показания следующего датчика. Параллельно с этим ведется подсчет количества датчиков, чьи показания были записаны. В пятом блоке ведется вычисление средней влажности всех работающих датчиков (MC) и уменьшение

размера матрицы W до одного элемента. После этого в блоке 6 проводится оценка количества отказавших датчиков. При отказе всех датчиков величина MC не меняется, при последовательном отказе всех датчиков более четырех раз подряд (блок 7) оператор сушильной камеры получает уведомление (блок 8). Для увеличения степени автоматизации перехода между режимами алгоритм дополнен тем, что при отказе всех РДВ и достижении влажности доски ниже 26 % дальнейшее управление режимом будет вестись по величине $EMC(T, H)$ (блок 9). В противном случае оператор получит сообщение о том, что управление и переход между режимами в автоматическом режиме невозможен (блок 10). В блоках 11 и 12 ведется определение текущего этапа сушки, тогда как в 13–15 заданы величины EMC , при достижении которых необходимо перейти на следующий этап. Для рассматриваемой сушильной камеры эти величины составляют 35, 15 и 8 % для перехода с первого на второй, со второго на третий и с третьего на этап остывания соответственно.

Рассмотренные алгоритмы применимы только для камер, работающих по осциллирующему методу сушки ПМ. При этом следует учитывать, что коэффициенты a_0 и a_1 могут незначительно меняться при смене сезонов, замене резистивных датчиков влажности в рамках одной камеры. Для камер с иными конструктивными особенностями величины коэффициентов могут быть отличными, но в результате нескольких итераций сушки будут определены оптимальные. Изменение геометрических размеров ПМ не оказывает влияния на измеряемое омическое сопротивление древесины и на величину равновесной влажности в камере, следовательно, можно использовать величины коэффициентов, полученных ранее для данного типа древесины. При изменении типа ПМ, подвергающегося сушке, может возникнуть необходимость в корректировке коэффициентов уравнения (3) для лучшего соответствия эмпирическим данным.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Макартичан С.В., Шилин А.Н., Стрижиченко А.В. Контроль влажности древесины и управление процессом ее сушки. – М.: ИД Акад. естествознания, 2014. – 175 с.
2. ГОСТ 16588-91 Пилопродукция и деревянные детали. Методы определения влажности. – М.: Стандартинформ, 2006. – 6 с.
3. Менде Ф.Ф., Шурупов И.А. Разработка и эксплуатация лесосушильных камер. Монография. – Харьков, 2014. – 68 с.
4. Energy consumption of beech timber drying in oscillation climates / G. Milić, B. Kolin, N. Todorović, Ž. Gorišek // *Drvna industrija*. – 2014. – Vol. 65. – P. 309–314. DOI: 10.5552/drind.2014.1367
5. Milić G., Kolin B. Oscillation drying of beech timber – initial experiments // *COST E53*. – 2008. – P. 115–124.
6. Сушильные камеры для сушки древесины // 2021–2023 «СКРОН»® URL: <http://www.scron.ru/> (дата обращения: 03.06.2025).
7. Ray P.P. Internet of Things based smart measurement and monitoring of wood Equilibrium Moisture Content // 2015 International Conference on Smart Sensors and Systems (IC-SSS). – 2015. – P. 1–5. DOI: 10.1109/SMARTSENS.2015.7873612.
8. Мазаник Н.В., Бабич Д.П., Рудак О.Г. Контроль состояния сушильного агента при камерной сушке пиломатериалов // Труды БГТУ. Лесная и деревообрабатывающая промышленность. – 2016. – № 2 (166). – С. 104–106.
9. Лызенко А.В., Буданов В.Ю., Кротова Л.Л. Анализ точности регулирования процесса сушки // Лесной и химический комплексы – проблемы и решения: сб. ст. по материалам Всерос. науч.-практ. конф. – Красноярск: СГТУ, 2007. – С. 42–45.
10. Comparison of wood moisture meters operating on different principles of measurement / A. Běťák, J. Zach, P. Misák, J. Vaněrek // *Buildings*. – 2023. – № 13 (2). – P. 531. DOI: 10.3390/buildings13020531

Обсуждение и заключение

В результате работы было показано, что ОМС порождает большое количество ПП, которые содержат обширную информацию о параметрах внутри сушильной камеры и текущем состоянии ПМ. Показано, что по величине постоянной времени влажного датчика нельзя напрямую судить о влажности древесины. Подтверждено, что по величине психрометрической разности при закрытии клапанов и изменении направления вращения вентиляции, что соответствует ПП «Перемешивание», можно с точностью до 2 % судить о текущей влажности ПМ. Благодаря этому становится возможным с помощью разработанного алгоритма провести в автоматическом режиме на основе аппроксимации вычисления влажности пиломатериала по равновесной влажности и температуре воздуха по окончании сушки ПМ.

В результате тарирования по РДВ становится возможным определять величину EMC не менее $(35 \pm 8) \%$, что достаточно для перехода в автоматическом режиме с первого на второй и затем на третий этапы сушки. Предложен алгоритм автоматического управления режимом сушки ПМ на основе показаний тарированных РДВ. Алгоритм учитывает факт возможного отказа всех РДВ и позволяет при достижении влажности доски ниже 26 % вести дальнейшее управление режимом по величине EMC , полученной на основании параметров сушильного агента в сушильной камере.

Дальнейшие исследования предполагают:

- изучение корреляции между постоянными времени остывания и нагрева для сухих датчиков;
- анализ взаимосвязи величины психрометрической разности с текущей влажностью ПМ;
- поиск скрытых корреляций для влажного датчика;
- создание математической модели для обучения нейросети, которая сможет оценивать и прогнозировать результат сушки.

11. Holger F., Veikko T. Accuracy and functionality of hand held wood moisture content meters. – Finland: VTT Technical Research Centre of Finland, 2000. – 102 p.
12. Zhang J., Cao J., Sun L. A novel fusion technique based functional link artificial neural network for lmc measuring // 2007 2nd IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications. – 2007. – P. 17–35. DOI: 10.1109/iciea.2007.4318453
13. Simpson W.T. Equilibrium moisture content of wood in outdoor locations in the united states and worldwide. – Madison, WI: USDA Forest Serv., Forest Prod. Lab., 1998. – 14 p.
14. Мазаник Н.В., Бабич Д.П. Режимы и качество сушки пиломатериалов в сушильных камерах различных производителей // Труды БГТУ. Лесная и деревообрабатывающая промышленность. – 2015. – № 2 (175). – С. 191–195.
15. Development and validation of a programmable logic device (PLD) based sensor and processor microarchitecture system for equilibrium moisture content calculation in wood industries / P. Tangirala, J.R. Heath, A. Radun, T. Conners // Proceedings of the 2006 IEEE Sensors Applications Symposium. – 2006. – P. 135–140. DOI: 10.1109/sas.2006.1634255
16. Прохоров С.В., Шилин А.А., Примочкин И.А. Синтез алгоритма диагностики работы электроприводов камеры сушки по датчикам температуры // Известия Юго-Западного государственного университета. – 2021. – Т. 25. – № 4. – С. 70–83. DOI: 10.21869/2223-1560-2021-25-4-70-83.
17. Grechushnikov V.V., Kachin O.S., Prokhorov S.V. Automated system of knowledge base acquisition for lumber drying processes // International Russian Automation Conference, RusAutoCon 2023: Proceedings. – Sochi, October 10–16, 2023. – P. 505–509.
18. Гигроскопические свойства древесины лиственных пород / С.П. Лоскутов, О.А. Шапченкова, А.А. Анискина, З. Пастори // Лесной вестник. – 2022. – Т. 26. – № 2. – С. 92–102. DOI: 10.18698/2542-1468-2022-2-92-102
19. Common sorption isotherm models are not physically valid for water in wood / E.E. Thybring, C.R. Boardman, S.L. Zelinka, S.V. Glass // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. – 2021. – Vol. 627. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2021.127214
20. Кречетов И.В. Сушка древесины. – М.: Лесная промышленность, 1980. – 432 с.
21. Wood moisturecontent measurement accuracy of impregnated and nonimpregnated wood / J. Barański, A. Suchta, S. Barańska, I. Klement, T. Vilková, P. Vilkovský // Sensors. – 2021. – № 21. DOI: 10.3390/s21217033
22. Investigation of electrical characteristics using various electrodes for evaluating the moisture content in wood / S. Hwang, T. Lee, K. Ahn, S. Pang, J. Park, J. Oh, H. Kwak, H. Yeo // BioResources. – 2021. – № 16 (4). – P. 7040–7055.
23. Tamme V., Muiste P., Tamme H. Experimental study of resistance type wood moisture sensors for monitoring wood drying process above fibre saturation point // Forestry Studies. Metsanduslikud Uurimused. – 2013. – № 59. – P. 28–44.
24. Божелко И.К., Олехнович А.М., Снопков В.Б. Измерение электропроводности древесины, используемой для шпал // Труды БГТУ. Лесная и деревообрабатывающая промышленность. – 2006. – № 2. – С. 241–244.
25. Wood handbook: wood as an engineering material. – Madison, WI, USDA Forest Service, 2010. – 508 p.
26. Sramm A.J. The electrical resistance of wood as a measure of its moisture content // Industrial and Engineering Chemistry. – 1927. – № 19 (9). – P. 1021–1025. DOI: 10.1021/ie50213a022

Информация об авторах

Владислав Викторович Гречушников, старший преподаватель отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. grechvv@tpu.ru; <http://orcid.org/0000-0002-4827-5906>

Сергей Валерьевич Прохоров, аспирант Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. sergei_prohorov@inbox.ru; <http://orcid.org/0000-0001-9308-4474>

Александр Анатольевич Шилин, доктор технических наук, профессор отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. shilin@tpu.ru; <http://orcid.org/0000-0002-4761-7249>

Поступила в редакцию: 09.06.2025

Поступила после рецензирования: 18.06.2025

Принята к публикации: 27.06.2025

REFERENCES

1. Makkartichyan S.V., Shilin A.N., Strizhichenko A.V. *Control of wood moisture content and management of its drying processing*. Moscow, Academy of Natural Sciences Publ. house, 2014. 175 p. (In Russ.)
2. SS 16588-91 *Sawn timber products and wooden parts. Methods for determining moisture content*. Moscow, Standartinform Publ., 2006. 6 p. (In Russ.)
3. Mende F.F., Shurupov I.A. *Development and operation of timber drying chambers*. Monograph Kharkov, 2014. 68 p. (In Russ.)
4. Milić G., Kolin B., Todorović N., Gorišek Ž. Energy consumption of beech timber drying in oscillation climates. *Drvna industrija*, 2014, vol. 65, pp. 309–314. DOI: 10.5552/drind.2014.1367
5. Milić G., Kolin B. Oscillation drying of beech timber – initial experiments. *COST E53*, 2008, pp. 115–124.
6. Drying chambers for drying wood. 2021–2023 "SCRON"® Available at: <http://www.scron.ru/> (accessed 3 June 2025).
7. Ray P.P. Internet of Things based smart measurement and monitoring of wood Equilibrium Moisture Content 2015 *International Conference on Smart Sensors and Systems (IC-SSS)*, 2015. pp. 1–5. DOI: 10.1109/SMARTSENS.2015.7873612.

8. Mazanik N.V., Babich D.P., Rudak O.G. Monitoring the state of the drying agent during chamber drying of lumber. *Proceedings of BSTU. Forestry and woodworking industry*, 2016, no. 2(166), pp. 104–106 (In Russ.)
9. Lyzenko A.V., Budanov V.Yu., Krotova L.L. Analysis of the accuracy of regulation of the drying process. *Forest and chemical complexes – problems and solutions. Collection of articles based on the materials of the All-Russian scientific and practical conference*. Krasnoyarsk, SSTU Publ., 2007. pp. 42–45 (In Russ.)
10. Běťák A., Zach J., Misák P., Vaněrek J. Comparison of wood moisture meters operating on different principles of measurement. *Buildings*, 2023, no. 13 (2), pp. 531. DOI: 10.3390/buildings13020531
11. Holger F., Veikko T. *Accuracy and functionality of hand held wood moisture content meters*. Finland, VTT Technical Research Centre of Finland, 2000. 102 p.
12. Zhang J., Cao J., Sun L. A Novel fusion technique based functional link artificial neural network for LMC measuring. *2007 2nd IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications*, 2007. pp. 17–35. DOI: 10.1109/iciea.2007.4318453
13. Simpson W.T. *Equilibrium moisture content of wood in outdoor locations in the united states and worldwide*. Madison, WI, USDA Forest Serv., Forest Prod. Lab., 1998. 14 p.
14. Mazanik N.V., Babich D.P. Drying modes and quality of sawn timber in drying chambers of various manufacturers. *Proceedings of BSTU. Forestry and woodworking industry*, 2015, no. 2 (175), pp. 191–195. (In Russ.)
15. Tangirala P., Heath J.R., Radun A., Conners T. Development and validation of a programmable logic device (PLD) based sensor and processor microarchitecture system for equilibrium moisture content calculation in wood industries. *Proceedings of the 2006 IEEE Sensors Applications Symposium*, 2006. pp. 135–140. DOI: 10.1109/sas.2006.1634255
16. Prokhorov S.V., Shilin A.A., Primochkin I.A. Synthesis of an algorithm for diagnosing the operation of electric drives of a drying chamber using temperature sensors. *Bulletin of the South-West State University*, 2021. vol. 25, no. 4, pp. 70–83. (In Russ.) DOI: 10.21869/2223-1560-2021-25-4-70-83.
17. Grechushnikov V.V., Kachin O.S., Prokhorov S.V. Automated system of knowledge base acquisition for lumber drying processes. *International Russian Automation Conference, RusAutoCon 2023. Proceedings*. Sochi, October 10–16, 2023. pp. 505–509.
18. Loskutov S.R., Shapchenkova O.A., Aniskina A.A., Pastori Z. Hygroscopic properties of deciduous wood. *Forest Bulletin*, 2022, vol. 26, no. 2, pp. 92–102. (In Russ.) DOI: 10.18698/2542-1468-2022-2-92-102
19. Thybring E.E., Boardman C.R., Zelinka S.L., Glass S.V. Common sorption isotherm models are not physically valid for water in wood. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2021, vol. 627. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2021.127214
20. Krechetov I.V. *Drying of wood*. Moscow, Forest industry Publ., 1980. 432 p. (In Russ.)
21. Barański J., Suchta A., Barańska S., Klement I., Vilkovská T., Vilkovský P. Wood moisture content measurement accuracy of impregnated and nonimpregnated wood. *Sensors*, 2021, no. 21. DOI: 10.3390/s21217033
22. Hwang S., Lee T., Ahn K., Pang S., Park J., Oh J., Kwak H., Yeo H. Investigation of electrical characteristics using various electrodes for evaluating the moisture content in wood. *BioResources*, 2021, no. 16 (4), pp. 7040–7055.
23. Tamme V., Muiste P., Tamme H. Experimental study of resistance type wood moisture sensors for monitoring wood drying process above fibre saturation point. *Forestry Studies. Metsanduslikud Uurimused*, 2013, no. 59, pp. 28–44.
24. Bozhelko I.K., Olekhovich A.M., Snopkov V.B. Measurement of electrical conductivity of wood used for sleepers. *Proceedings of BSTU. Forestry and woodworking industry*, 2006, no. 2, pp. 241–244.
25. *Wood handbook: wood as an engineering material*. Madison, WI, USDA Forest Service, 2010. 508 p.
26. Sramm A.J. The electrical resistance of wood as a measure of its moisture content. *Industrial and Engineering Chemistry*, 1927, no. 19 (9), pp. 1021–1025. DOI: 10.1021/ie50213a022

Information about the authors

Vladislav V. Grechushnikov, Senior Lecturer, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. grechvv@tpu.ru, <http://orcid.org/0000-0002-4827-5906>

Sergey V. Prokhorov, Postgraduate Student, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. sergei_prokhorov@inbox.ru, <http://orcid.org/0000-0001-9308-4474>

Alexander A. Shilin, Dr. Sc., Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. shilin@tpu.ru, <http://orcid.org/0000-0002-4761-7249>

Received: 09.06.2025

Revised: 18.06.2025

Accepted: 27.06.2025

УДК 556.31 553.98
DOI: 10.18799/24131830/2025/7/5034
Шифр специальности ВАК: 1.6.6
Научная статья

Бензол, толуол в природных водах восточного обрамления Сибирской платформы в связи с оценкой перспектив нефтегазоносности

Д.С. Малков^{1✉}, А.И. Сурнин², Н.В. Гусева¹

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

² Акционерное общество «Сибирский научно-исследовательский институт геологии, геофизики и минерального сырья», Россия, г. Новосибирск

✉ MalkovDS@tpu.ru

Аннотация. Актуальность. Исследования нефтегазоносности восточного обрамления Сибирской платформы ведутся с начала XX в., однако до сих пор эта территория изучена крайне слабо. Основной объем работ был сосредоточен в бассейне р. Вилюй, в то время как смежные территории правобережья рек Лены и Алдан остаются заметно менее изучены. Информация о геохимии природных вод данной области в открытых источниках представлена крайне скудно, а по содержанию ряда органических соединений (бензол, толуол), применяемых как прямой поисковый показатель нефтегазоносности, и вовсе отсутствует. Выявление новых перспективных, в том числе глубокопогруженных, зон нефтегазоаккумуляции и расширение углеводородного потенциала Восточной Сибири будет способствовать развитию промышленности и достижению национальных целей по освоению территории Якутии, имеющей огромное экономическое и геополитическое значение. **Цель:** анализ распространенности бензола и толуола в природных водах восточного обрамления Сибирской платформы и обоснование их роли при оценке перспектив нефтегазоносности. **Методы.** Аналитические исследования по определению ароматических углеводородов (бензол, толуол) выполнены в испытательном лабораторном Центре гигиены и эпидемиологии в Новосибирской области на газовом хроматографе «Кристал-2000М», аккредитованном методом равновесного пара с чувствительностью 0,001 мг/л. **Результаты.** Приводится обширный фактический материал по содержанию ароматических углеводородов (бензол, толуол) в составе природных вод бассейнов рек Хамны, Аллах-Юнь, Восточной Хандыги, Томпо, Ляписке (Лямпущка) и Соболах-Маян (Собопол). Полученный первый гидрогеохимический материал во многом носит рекогносцировочный характер, однако свидетельствует о хороших перспективах нефтегазоносности изучаемой территории.

Ключевые слова: Предверхоанский прогиб, Предсеттедабанский прогиб, ароматические углеводороды, химический состав природных вод, гидрогеохимические поиски, нефтегазоносность, бензол, толуол, Сибирская платформа

Для цитирования: Малков Д.С., Сурнин А.И., Гусева Н.В. Бензол, толуол в природных водах восточного обрамления Сибирской платформы в связи с оценкой перспектив нефтегазоносности // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 7. – С. 189–196. DOI: 10.18799/24131830/2025/7/5034

UDC 556.31 553.98
DOI: 10.18799/24131830/2025/7/5034
scientific paper

Benzene and toluene in the natural waters of the eastern rim of the Siberian platform by oil and gas potential assessment

D.S. Malkov^{1✉}, A.I. Surnin², N.V. Guseva¹

¹ National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

² Joint Stock Company Siberian Scientific Research Institute of Geology, Geophysics and Mineral Resources, Novosibirsk, Russian Federation

✉ MalkovDS@tpu.ru

Abstract. Relevance. Studies of the oil and gas potential of the eastern rim of the Siberian Platform have been conducted since the beginning of the 20th century, however, so far this territory has been studied extremely poorly. The bulk of the work was concentrated in the Vilyui River basin, while the adjacent territories on the right banks of the Lena and Aldan rivers remain noticeably less studied. Information on the geochemistry of natural waters in this area is extremely sparsely presented in open sources, and the content of a number of organic compounds (benzene, toluene), used as a direct indicator of oil and gas potential, is completely absent. The identification of new promising oil and gas accumulation zones and the expansion of the hydrocarbon potential of Eastern Siberia will contribute to the development of industry and the achievement of national goals for the development of the territory of Yakutia, which is of great economic and geopolitical importance. **Aim.** To analyze benzene and toluene prevalence in the natural waters of the eastern rim of the Siberian Platform and substantiate their role in assessing oil and gas potential. **Methods.** Analytical studies on the determination of aromatic hydrocarbons (benzene, toluene) were performed at the testing laboratory center of the Center for Hygiene and Epidemiology in the Novosibirsk Region on a Crystal-2000M gas chromatograph, using an accredited equilibrium vapor method with a sensitivity of 0.001 mg/l. **Results.** The paper provides extensive factual material on the content of aromatic hydrocarbons (benzene, toluene) in the natural waters of the basins of the Hamna, Allah Yun, Vostochnaya Khandyga, Tompo, Lyapiske (Lampushka) and Sobolokh-Mayan rivers (Sobopol). The obtained first hydrogeochemical material is largely of a reconnaissance nature, however, it indicates good prospects for the oil and gas potential of the studied area.

Keywords: Predverkhoyansk foredeep, Predsettedaban foredeep, aromatic hydrocarbons, chemical composition of natural waters, hydrogeochemical prospecting, oil and gas potential, benzene, toluene, Siberian platform

For citation: Malkov D.S., Surnin A.I., Guseva N.V. Benzene and toluene in the natural waters of the eastern rim of the Siberian platform by oil and gas potential assessment. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 7, pp. 189–196. DOI: 10.18799/24131830/2025/7/5034

Введение

Рассмотренная в данной работе территория охватывает восточные приграничные районы Сибирской платформы и обрамляющие ее Предверхоянский и Предсеттедабанский предгорные (краевые, перикратонные) прогибы. Активные нефтегазопромысловые работы, проводившиеся в 1950–1960 гг. в границах Виллюской синеклизы, привели к открытию нескольких газоконденсатных месторождений на левобережье р. Лены. Дальнейшее параметрическое бурение дало отрицательные результаты, что связано, прежде всего, с низким качеством сейсмического материала и низкой степенью изученности [1, 2].

Геохимические исследования по прямым признакам нефтегазоносности методом принудительной дегазации русловых отложений проводились на территории Якутии начиная с 1976 г. по методике Всесоюзного научно-исследовательского геологоразведочного нефтяного института (ВНИГРИ) и были сосредоточены, преимущественно, в бассейне р. Виллюй [3].

Вопросами информативности распределения ароматических углеводородов в приповерхностных средах занимались А.С. Зингер, Л.М. Зорькин, М.И. Суббота, А.А. Карцев, А.Р. Курчиков, Р.И. Тимшанов и ряд других исследователей [4–6].

Целенаправленных гидрогеологических исследований в описываемом районе не проводилось. В процессе геологосъемочных работ выполнялось опробование главным образом надмерзлотных и поверхностных вод. В единичных случаях опробованы межмерзлотные воды в поисково-разведочных колонковых скважинах.

Новые геологические данные, полученные в ходе сейсморазведочных работ 2010–2016 гг., существенно уточнили строение восточной периферии Сибирской платформы и в комплексе с представленными результатами гидрогеохимического опробования указывают на положительные перспективы обнаружения промышленных скоплений углеводородов, а также на необходимость наращивания объемов новых поисково-разведочных работ [7, 8]. Перспективным направлением является изучение глубокопогруженных нефтяных и газовых систем, интерес к которым в последние годы заметно усилился [9–12].

Информация о геохимии природных вод данной области в открытых источниках представлена крайне скудно, а по содержанию ряда органических соединений (бензол, толуол), применяемых как прямой поисковый показатель нефтегазоносности, и вовсе отсутствует.

Целью данного исследования является анализ распространенности бензола и толуола в природных водах восточного обрамления Сибирской платформы и обоснование их роли при оценке перспектив нефтегазоносности.

Объект и методы исследования

За пять полевых сезонов – с 2011 по 2015 гг. – было пройдено девять маршрутов по долинам шести рек в направлении с юга на север: Хамна, Аллах-Юнь, Восточная Хандыга, Томпо, Ляписке (Лямпущка) и Соболах-Маян (Собопол) (рис. 1). Проведенные исследования можно условно разбить на три этапа.

Этап 1. Исследования в зоне сопряжения восточного борта Алдано-Майской впадины и западной части Нелькано-Кыллахского надвига в Сетте-

Дабанской ветви Верхоянского складчато-надвигового пояса с гидрогеохимическим опробованием по долинам рек Аллах-Юнь (2011, 2012 гг.) и Хамна (2012, 2014 гг.). В 2012 и 2014 гг. полевые работы проводились в зимнее время с опробованием водотоков из-под льда в меженный период. Методически это обосновано возможностью обнаружения более контрастных аномалий, так как водное питание рек в этот период обеспечивается, преимущественно, за счет подземного стока.

Этап 2. Исследования в районе восточного окончания Алданской ветви Предверхоянского прогиба с выходом в зону моноклинального погружения мезозойских отложений с опробованием по долинам рек Томпо (2014, 2015 гг.) и Восточной Хандыги (2014 г.).

Этап 3. Исследования в пределах Ленской ветви Предверхоянского прогиба с гидрогеохимическим опробованием по долинам рек Ляписке (Лямпушка) и Соболах-Маян (Собопол) выполненные в 2015 г.

Основные характеристики исследуемых водных объектов приведены в табл. 1.

Таблица 1. Основные характеристики исследуемых рек [13, 14]

Table 1. The main characteristics of the studied rivers [13, 14]

Река/River	Площадь водосбора, км ² Water collecting area, km ²	Длина, км Length, km	Расход воды, м ³ /с River flow, m ³ /s
р. Хамна/Hamna river	3520	222	–
р. Аллах-Юнь Allah-Yun river	24200	586	234,7 (16 км от устья/km from the river mouth)
р. В. Хандыга East Khandyga river	9950	290	27,3 (202 км от устья/km from the river mouth)
р. Томпо Tampo river	42700	570	158,6 (279 км от устья/km from the river mouth)
р. Ляписке Lapiske river	10300	299	–
р. Собопол Sobopol river	13300	411	82,1 (240 км от устья/km from the river mouth)

Помимо основного русла и притоков исследуемых рек, отбор воды осуществлялся на надпойменных террасах, на участках скрытой разгрузки подземных вод – в озерах, старицах, в основании высоких склонов бортов долин.

Пробы воды на содержание ароматических углеводородов (бензол, толуол) объемом 50 мл отбирались в толстостенные флаконы из темного стекла без консервации. Измерение концентраций анализируемых соединений выполнялось методом газовой хроматографии с пламенно-ионизационным

детектированием. Извлечение из воды бензола и толуола осуществлялось газовой экстракцией при нагревании в замкнутом объеме с последующим анализом равновесной паровой фазы. Аналитические работы были выполнены в «Центре гигиены и эпидемиологии» в Новосибирской области на газовом хроматографе «Кристалл-2000М» с чувствительностью 0,001 мг/л (МУК 4.1.650-96).

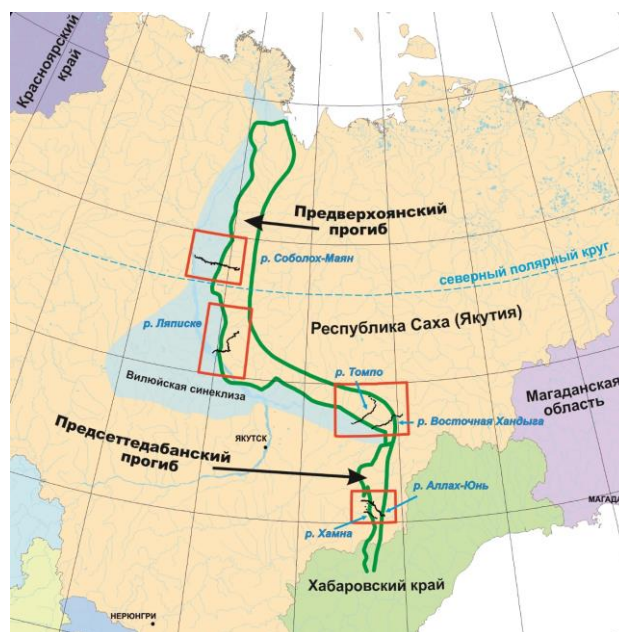


Рис. 1. Обзорная схема района исследований
Fig. 1. Overview scheme of the research area

Результаты исследования и их обсуждение

Химический состав природных вод восточного обрамления Сибирской платформы разнообразен. Величина pH изменяется от 5,5 до 8,4 при среднем значении 7,2. Окислительно-восстановительный потенциал находится в пределах от 28 до 292 мВ. Общая минерализация изученных вод, как правило, не превышает 200 мг/л, а ионный состав вод представлен Ca^{2+} , Mg^{2+} , HCO_3^- и SO_4^{2-} . Однако в долинах рек Ляписке и Соболах-Маян были опробованы нетипичные для данной территории воды хлоридного натриевого и гидрокарбонатного натриевого состава [15, 16].

В рамках работ 2011 г. была исследована долина р. Аллах-Юнь. Из 45 проб, отобранных на исследование ароматических углеводородов, бензол был обнаружен в 29 (64 %), а толуол – в 35 (78 %) от общего числа изученных образцов. Наиболее высокие содержания бензола (0,073–0,12 мг/л) и толуола (0,054–0,069 мг/л) отмечены в точках наблюдения, расположенных несколько западнее Нельканского разлома – в наиболее погруженной части Предсетедабанского прогиба. Средние значения бензола и

толуола в воде, без учета «пустых» проб, где исследуемые компоненты не были выявлены в концентрациях выше предела чувствительности используемого аналитического метода (0,001 мг/л), составили 0,022 и 0,013 мг/л соответственно (табл. 2).

В результате повторных исследований в зимний межень период в марте 2012 г. установлено, что общая минерализация вод р. Аллах-Юнь выросла в среднем в 2,5 раза (табл. 2), что обусловлено питанием реки преимущественно за счет подземного стока. По данным [13] расчетное распределение месячного стока в марте составляет только 0,01 % от годового. Однако принципиальных изменений химического типа воды не наблюдается: рассматриваемые воды являются гидрокарбонатными кальциевыми, магниевыми-кальциевыми.

Минерализация природных вод бассейна реки Хамны, опробованных также в зимний межень период в 2012 г., значительно ниже, чем в р. Аллах-Юнь, и составляет 113 мг/л. Это объяснимо существенно меньшей площадью ее водосбора. В ионном составе увеличивается доля иона хлора – до 9 %-экв. (против 3 %-экв. в р. Аллах-Юнь), а в некоторых точках превышает 15 %-экв. Это может быть обусловлено поступлением указанного иона в реки за счет восходящей глубинной разгрузки подземных вод по дизъюнктивным нарушениям.

В водах р. Хамны, опробованных в зимний период, в отдельных точках отмечаются ураганные содержания бензола и толуола – до 0,30 и 0,23 мг/л, соответственно. Ввиду отсутствия антропогенных источников поступления указанных компонентов в рассматриваемом районе такие высокие концентрации ароматических углеводородов в водах исследуемых объектов можно рассматривать в качестве прямых показателей нефтегазоносности.

Заверочный полевой маршрут зимнего сезона 2014 г. в объеме 30 проб подтвердил высокие концентрации ароматических углеводородов в природных водах бассейна р. Хамны. Максимальные содержания бензола и толуола составили 0,23 и 0,31 мг/л при средних значениях 0,028 и 0,025 мг/л, соответственно.

Полевыми маршрутами 2014 г. были исследованы бассейны рек Восточной Хандыги и Томпо. Содержание бензола во всех пробах – ниже предела обнаружения метода – 0,001 мг/л, хотя вследствие более простого строения молекулы и лучшей растворимости в воде (1,79 против 0,53 г/л для толуола) он обладает большей миграционной способностью, чем толуол. Однако температура плавления бензола составляет +5,5 °С, соответственно в условиях отрицательных температур бензол кристаллизуется и его проникновение в поверхностные воды может быть затруднено. Таким образом, толща многолетнемерзлых пород (ММП), мощность которой в исследуемом районе достигает нескольких сот метров, может являться своеобразной непроницаемой крышкой для бензола. Толуол остается подвижным в более широком диапазоне температур и хорошо мигрирует в подземных водах криолитозоны. Его концентрации в водах исследуемого района достигают значений до 0,6 мг/л. Полное отсутствие в водах бензола говорит в пользу глубинного источника поступления толуола в поверхностные воды. Особенно контрастно выглядит аномалия толуола, выявленная в районе Томпурокской антиклинали в нижнем течении р. Томпо. Во всех пробах воды, отобранных на 10-километровом участке реки после ее пересечения Томпурокской структуры, выявленной по данным гравиметрической съемки, отмечаются аномальные содержания толуола – от 0,07 до 0,6 мг/л (рис. 2).

Таблица 2. Содержания ароматических углеводородов

Table 2. Content of aromatic hydrocarbons

Объект Object	Год Year	Кол-во проб Quantity of samples	Мощ. TDS	Бензол/Benzene			Толуол/Toluene		
				%	мг/л/mg/l		%	мг/л/mg/l	
				>0,001 mg/l	Сред./Avg	Max	>0,001 mg/l	Сред./Avg	Max
бассейн р. Аллах-Юнь Allah-Yun river basin	2011	45	106,8	64	0,022	0,120	78	0,013	0,069
	2012	29	269,9	41	0,008	0,028	45	0,014	0,048
бассейн р. Хамны Hamna river basin	2014	10	113,0	30	0,145	0,300	50	0,085	0,230
		30	123,5	37	0,028	0,230	60	0,025	0,310
бассейн р. В. Хандыги East Khandyga river basin	2014	53	136,7	0	–	–	8	0,005	0,011
бассейн р. Томпо Tompo river basin	2015	64	85,8	0	–	–	11	0,156	0,600
		30	118,0	0	–	–	53	0,006	0,017
бассейн р. Ляписке Lapiske river basin	2015	128	64,3	0	–	–	16	0,004	0,016
бассейн р. Собопол Sobopol river basin		169	117,2	9	0,007	0,024	40	0,013	0,070
Итого проб воды Total water samples		558	–	13	–	–	35	–	–

Примечание: Проценты указывают долю проб с содержанием бензола/толуола >0,001 мг/л, цветом выделены объекты, опробованные в период зимней межени.

Note: Percentages show the proportion of samples with a benzene/toluene content >0.001 mg/l, the objects tested during the winter low water period are highlighted in color.

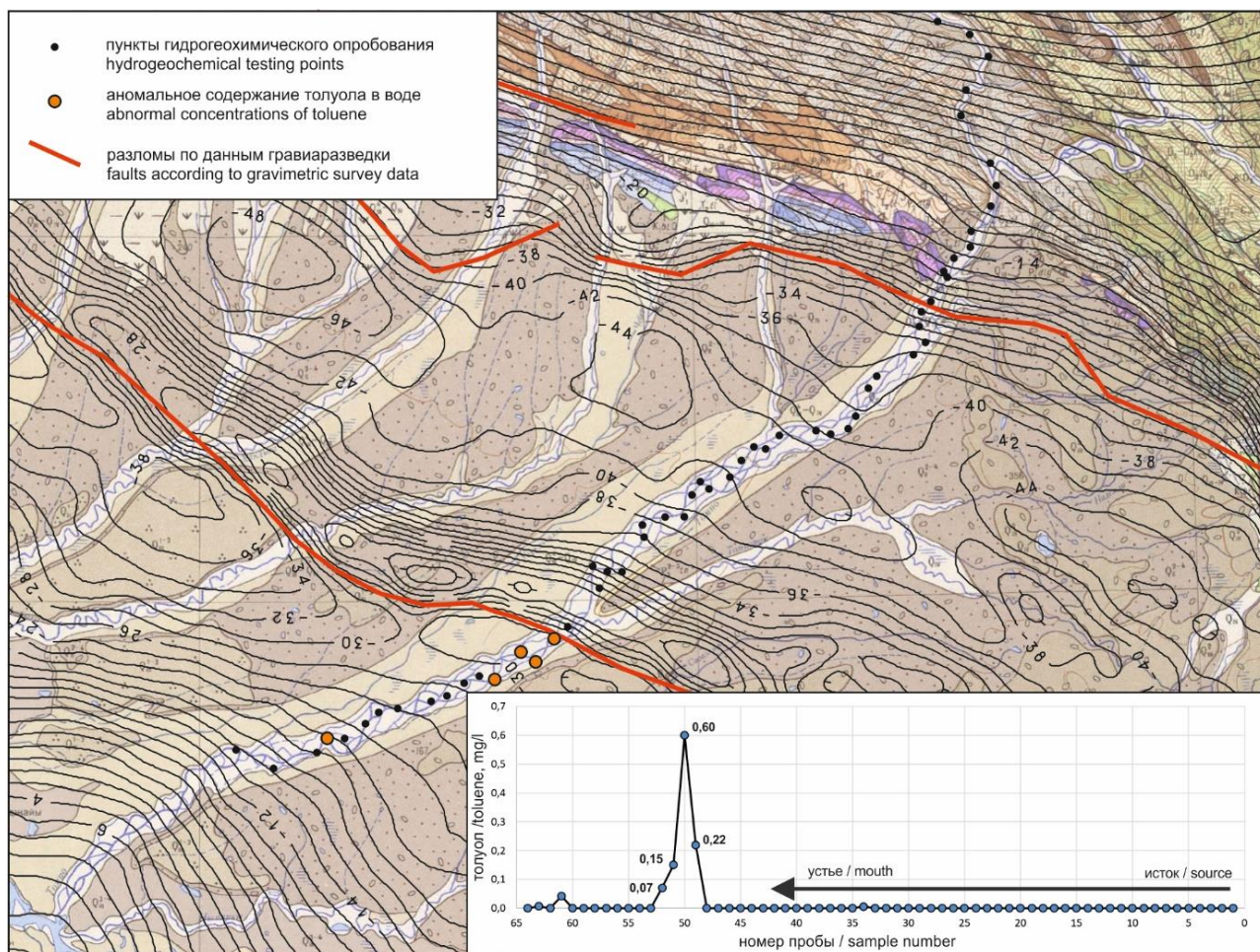


Рис. 2. Содержание толуола в природных водах бассейна р. Томпо
Fig. 2. Toluene content in the natural waters of the Tompo river basin

Поисковое значение этого показателя подтверждают данные колонкового бурения на Томпурской площади, где в керне обнаружены капельные выделения битумов.

В 2015 г. были исследованы долины рек Ляписке (Лямпущка) и Соболох-Маян (Собопол). Полученный аналитический материал показал присутствие высоких концентраций ароматических углеводородов (бензола и толуола) в природных водах. Содержания толуола более 0,001 мг/л были определены в 40 % проб, отобранных в бассейне р. Собопол, и в 18 % проб в бассейне р. Ляписке. Высокие концентрации толуола (>0,01 мг/л) были выявлены в двадцати шести пробах и отмечены практически на всех участках маршрута по р. Соболох-Маян. Бензол с концентрацией более 0,01 мг/л был выявлен только в трех пробах воды на участках совместного проявления бензола и толуола в зоне Орулганского надвига и на моноклинали внешнего борта прогиба также в бассейне р. Соболох-Маян. Вероятно, это связано с наличием проницаемых для бензола каналов – таликовых зон, сформированных плотным тепловым потоком над активными

разломами. По таким ослабленным тектоническим зонам в результате диффузионно-фильтрационного массопереноса может осуществляться субвертикальная миграция углеводородов из залежей, формируя в приповерхностных средах поля аномальных концентраций, что и лежит в основе геохимических методов поиска углеводородных скоплений. Кроме этого, подтверждением современных процессов глубинной восходящей разгрузки подземных вод на изученной территории является выявленный аномальный ионный состав речных вод – хлоридный натриевый и гидрокарбонатный натриевый в пределах долин рек Ляписке и Соболох-Маян [15, 16].

Заключение

В результате исследований установлена распространенность бензола и толуола в природных водах восточной периферии Сибирской платформы. Тoluол в значительных концентрациях был обнаружен во всех без исключения опробуемых объектах (32 % исследуемых проб), в то время как бензол только в 12 % проб. Полное отсутствие бензола

(<0,001 мг/л) отмечается во всех пробах природных вод бассейнов рек Восточной Хандыги, Томпо и Ляписке, что, возможно, связано с затруднениями его миграции в приповерхностные среды, вероятно, из-за наличия мощной толщи ММП. Совместные проявления бензола и толуола отмечены при опробовании южных территорий (бассейны рек Аллах-Юнь и Хамны), где мощность ММП ниже и за счет плотного теплового потока над активными разломами могут быть сформированы сквозные таликовые зоны.

Наиболее высокие концентрации бензола были получены при опробовании бассейна р. Хамны в период зимней межени (до 0,3 мг/л при среднем содержании 0,145 мг/л). Наиболее высокие концентрации толуола (до 0,6 мг/л при среднем содержании 0,156 мг/л) отмечены в пробах из р. Томпо после ее пересечения надвиговой структуры Томпурского вала. Полученные в ходе гидрогеохимических

работ результаты указывают на положительные перспективы нефтегазоносности территории восточного обрамления Сибирской платформы.

Эффективность применения геохимических методов поисков углеводородов, основанных на распределении в поверхностных средах повышенных концентраций ароматических углеводородов, отмечается многими российскими и зарубежными авторами [17–21]. Повышенное содержание в водах бензола и его гомологов является одним из наиболее показательных поисковых критериев.

К неоспоримым преимуществам гидрогеохимического опробования по поверхностным водотокам можно отнести дешевизну и высокую скорость проведения работ. На основе представленного опыта рекомендуется шире применять эти методы для опережающей рекогносцировочной оценки малоизученных территорий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Oil and gas potential of the Siberian Platform / A.E. Kontorovich, K.K. Makarov, N.V. Melnikov V.E. Savitsky, V.S. Staroseltsev, V.S. Surkov, K.R. Chepikov // World Petroleum Congress Proceedings 10. – Bucharest, 09–14 September 1979. – P. 183–189.
2. Мигурский Ф.А., Якупова Е.М. Обоснование региональных исследований нефтегазоносности Предверхоанского перикратонного прогиба // Геология нефти и газа. – 2017. – № 3. – С. 18–25.
3. Сивцев А.И., Калинин А.И. Прямые геохимические исследования в Вилюйской синеклизе // Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова. Серия: Науки о Земле. – 2024. – № 2 (34). – С. 13–24. DOI: 10.25587/2587-8751-2024-2-13-24.
4. Курчиков А.Р., Тимшанов Р.И. Связь полей распределения содержания бензола и толуола в подпочвенных глинах с нефтеносностью отложений (на примере месторождений юга Западной Сибири) // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2012. – № 10. – С. 10–18.
5. Жильцова А.А., Коржов Ю.В., Исаев В.И. Геохимическое прогнозирование залежей нефти по аномалиям ароматических углеводородов // Разведка и охрана недр. – 2011. – № 1. – С. 18–20.
6. Kharaka Y., Hitchon B., Hanor J. Groundwater and petroleum. – Ontario: Groundwater project, 2024. – 372 p
7. Перспективы нефтегазоносных территорий восточного обрамления Сибирской платформы по материалам геологоразведочных работ последних лет / А.В. Погодаев, Р.Ф. Севостьянова, М.И. Слепцова, А.М. Жарков, К.А. Павлова // Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова. Серия: Науки о Земле. – 2024. – № 4 (36). – С. 33–48. DOI: 10.25587/2587-8751-2024-4-33-48.
8. Щепелин М.А., Делиу Е.А., Хуснулина Г.Р. Геологическое строение и перспективы открытия месторождения в южной части Предверхоанской нефтегазоносной области (республика Саха (Якутия)) // Фундаментальный базис инновационных технологий нефтяной и газовой промышленности. – М., 17–19 октября 2022. – М.: ИПНГ РАН, 2022. – С. 380–383.
9. Deep-buried Lower Paleozoic oil and gas systems in eastern Siberian Platform: geological and geophysical characteristics, estimation of hydrocarbon resources / A.E. Kontorovich, L.M. Burshtein, I.A. Gubin, T.M. Parfenova, P.I. Safronov // Journal of Mining Institute. – 2024. – Vol. 269. – P. 721–737.
10. Guangyou Z., Milkov A., Zhiyao Z. Formation and preservation of a giant petroleum accumulation in superdeep carbonate reservoirs in the southern Halahatang oil field area, Tarim Basin, China // The American Association of Petroleum Geologists Bulletin. – 2019. – Vol. 103. – № 7. – P. 1703–1743. DOI: 10.1306/11211817132
11. Guangyou Z., Zhiyao Z., Xiaoxiao Z. Preservation of ultra-deep liquid oil and its exploration limit // Energy & Fuels. – 2018. – Vol. – 32. – № 11. – P. 11165–11176. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.8b01949
12. Bin C., Hua L., Zicheng C. Origin of deep oil accumulations in carbonate reservoirs within the north Tarim Basin: Insights from molecular and isotopic compositions // Organic Geochemistry. – 2020. – Vol. 139. – № 103931. DOI: 10.1016/j.orggeochem.2019.103931
13. Ресурсы поверхностных вод СССР: Гидрологическая изученность. Т. 17. Ленско-Индигоирский район. Вып. 5. Нижняя Лена (бассейн р. Лены ниже устья р. Вилюй) / под ред. А.С. Шароглазова. – Л.: Гидрометеиздат, 1965. – 120 с.
14. Ресурсы поверхностных вод СССР: гидрологическая изученность. Т. 17. Ленско-Индигоирский район. Вып. 3. Бассейн р. Алдан / под ред. И.В. Осиповой. – Л.: Гидрометеиздат, 1966. – 210 с.
15. Малков Д.С., Сурнин А.И., Гусева Н.В. Химический состав природных вод восточного обрамления Сибирской платформы (Предверхоанский прогиб) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 11. – С. 197–209. DOI: 10.18799/24131830/2024/11/4564
16. Малков Д.С. Химический состав воды озера Куолланда-Кюэль (Предверхоанский прогиб, Якутия) // Проблемы геологии и освоения недр: Труды XXVII Международного молодежного научного симпозиума имени академика М.А. Усова. –

Томск, 03–07 апреля 2023. – Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2023. – С. 154–155.

17. Potential petroleum prospects in the middle Benue trough, central Nigeria: inferences from integrated applications of geological, geophysical and geochemical studies / U.A. Lar, T. Bata, H. Dibal, S.N. Yusuf, I. Lekmanga, M. Goyit, E. Yennea // *Scientific African*. – 2022. – Vol. 19. DOI: 10.1016/j.sciaf.2022.e01436.
18. Chongxi L., Xueming W. Near surface hydrogeochemical exploration for oil and gas in China // *Journal of Southeast Asian Earth Sciences*. – 1991. – Vol 5. – № 1–4. – P. 313–316.
19. Philp R.P., Crisp P.T. Surface geochemical methods used for oil and gas prospecting — a review // *Journal of Geochemical Exploration*. – 1982. – Vol. 17. – № 1. – P. 1–34.
20. Gene Collins A. Geochemical methods of exploration for petroleum and natural gas // *Developments in Petroleum Science*. – 1975. – Vol. 1. – P. 307–341. doi:10.1016/S0376-7361(08)70203-6
21. Novikov D.A. Hydrogeochemistry of the Arctic areas of Siberian petroleum basins // *Petroleum Exploration and Development*. – 2017. – Vol. 44. – № 5. – P. 737–744.

Информация об авторах

Денис Сергеевич Малков, аспирант отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов, Национальный исследовательский Томский политехнический университет. Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30; MalkovDS@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0001-9614-7506>

Алексей Иванович Сурнин, кандидат геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией гидрогеологии нефтегазоносных провинций Акционерного общества «Сибирский научно-исследовательский институт геологии, геофизики и минерального сырья», Россия, 630091, г. Новосибирск, Красный пр., 67. SurninAI@rusgeology.ru

Наталья Владимировна Гусева, доктор геолого-минералогических наук, профессор, заместитель директора по научно-образовательной деятельности Инженерной школы природных ресурсов, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30; GusevaNV@tpu.ru

Поступила в редакцию: 26.02.2025

Поступила после рецензирования: 26.05.2025

Принята к публикации: 16.06.2025

REFERENCES

1. Kontorovich A.E., Makarov K.K., Melnikov N.V., Savitsky V.E., Staroseltsev V.S., Surkov V.S., Trofimuk A.A., Chepikov K.R. Oil and gas potential of the Siberian Platform. *World Petroleum Congress Proceedings*. Bucharest, Romania, September 9–14, 1979. pp. 183–189.
2. Migursky F.A., Yakupova E.M. Feasibility of regional studies of oil and gas potential of the Predverkhoyansk pericratonic foredeep. *Geology of oil and gas*, 2017, no. 3, pp. 18–25. (In Russ.)
3. Sivtsev A.I., Kalinin A.I. Direct geochemical studies in the Vilyui syncline. *Vestnik of North-Eastern Federal University Series "Earth Sciences"*, 2024, no. 2 (34), pp. 13–24. (In Russ.) DOI: 10.25587/2587-8751-2024-2-13-24
4. Kurchikov A.R., Timshanov R.I. Relation of benzol and toluol distribution fields in subsoil clays with oil-bearing rocks (on the example of the deposits at the south of west siberia). *Geology, geophysics and development of oil and gas fields*, 2012, no. 10, pp. 10–18. (In Russ.)
5. Zhiltsova A.A., Korzhov J.V., Isaev V.I. Geochemical prediction of deposits of oil on anomalies of aromatic hydrocarbons. *Prospect and protection of mineral resources*, 2011, no. 1, pp. 18–20. (In Russ.)
6. Kharaka Y., Hitchon B., Hanor J. *Groundwater and petroleum*. Ontario, Groundwater project, 2024. 372 p.
7. Pogodaev A.V., Sevostianova R.F., Sleptsova M.I., Zharkov A.M., Pavlova K.A. Oil and gas perspective of the eastern border of the Siberian platform based on recent exploration data. *Vestnik of North-Eastern Federal University. Earth Sciences*, 2024, no. 4 (3b), pp. 33–48. (In Russ.) DOI: 10.25587/2587-8751-2024-4-33-48.
8. Shchepelin M.A., Deliu E.A., Khusnullina G.R. Geological structure and prospects of field discovery in the southern part of the Predverkhoyansk oil and gas region (Republic of Sakha (Yakutia)). *Fundamental basis of innovative technologies of the oil and gas industry*. Moscow, October 17–19, 2022. Moscow, IPNG RAS Publ., 2022. pp. 380–383. (In Russ.)
9. Kontorovich A.E., Burshtein L.M., Gubin I.A., Parfenova T.M., Safronov P.I. Deep-buried Lower Paleozoic oil and gas systems in eastern Siberian Platform: geological and geophysical characteristics, estimation of hydrocarbon resources. *Journal of Mining Institute*, 2024, vol. 269, pp. 721–737.
10. Guangyou Z., Milkov A., Zhiyao Z. Formation and preservation of a giant petroleum accumulation in superdeep carbonate reservoirs in the southern Halahatang oil field area, Tarim Basin, China. *The American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 2019, vol. 103, no. 7, pp. 1703–1743. DOI: 10.1306/11211817132
11. Guangyou Z., Zhiyao Z., Xiaoxiao Z. Preservation of ultradeep liquid oil and its exploration limit. *Energy & Fuels*, 2018, vol. 32, no. 11, pp. 11165–11176. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.8b01949
12. Bin C., Hua L., Zicheng C. Origin of deep oil accumulations in carbonate reservoirs within the north Tarim Basin: insights from molecular and isotopic compositions. *Organic Geochemistry*, 2020, vol. 139, no. 103931. DOI: 10.1016/j.orggeochem.2019.103931
13. *Surface water resources of the USSR: hydrological studies. Vol. 17. Lensk-Indigirsky district. Iss. 5. Lower Lena (Lena river basin below the mouth of the Vilyui River)*. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1965. 120 p. (In Russ.)

14. *Surface water resources of the USSR: hydrological studies. Vol. 17. Lensk-Indigirsky district. Iss. 3. Aldan River basin.* Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1966. 210 p. (In Russ.)
15. Malkov D.S., Surnin A.I., Guseva N.V. Chemical composition of natural waters of the eastern rim of the Siberian platform (Predverkhoyansk foredeep). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 11, pp. 197–209. DOI: 10.18799/24131830/2024/11/4564
16. Malkov D.S. Chemical composition of the water of Lake Kuollanda-Kuel (Predverkhoyansk foredeep, Yakutia). *Problems of geology and subsoil development. Proc. of the XXVII International Youth Scientific Symposium named after Academician M.A. Usov.* Tomsk, April 03–07, 2023. Tomsk, National Research Tomsk Polytechnic University Publ., 2023. pp. 154–155. (In Russ.)
17. Lar U.A., Bata T., Dibal H., Yusuf S.N., Lekmanga I., Goyit M., Yennea E. Potential petroleum prospects in the middle Benue trough, central Nigeria: inferences from integrated applications of geological, geophysical and geochemical studies. *Scientific African*, 2022, vol. 19. DOI: 10.1016/j.sciaf.2022.e01436.
18. Chongxi L., Xueming W. Near surface hydrogeochemical exploration for oil and gas in China. *Journal of Southeast Asian Earth Sciences*, 1991, vol. 5, no. 1–4, pp. 313–316.
19. Philp R.P., Crisp P.T. Surface geochemical methods used for oil and gas prospecting – a review. *Journal of Geochemical Exploration*, 1982, vol. 17, no. 1, pp. 1–34.
20. Gene Collins A. Geochemical methods of exploration for petroleum and natural gas. *Developments in Petroleum Science*, 1975, vol. 1, pp. 307–341. DOI:10.1016/S0376-7361(08)70203-6.
21. Novikov D.A. Hydrogeochemistry of the Arctic areas of Siberian petroleum basins. *Petroleum Exploration and Development*, 2017, vol. 44, no. 5, pp. 737–744.

Information about the author

Denis S. Malkov, Postgraduate Student, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. MalkovDS@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0001-9614-7506>

Alexey I. Surnin, Cand. Sc., Head of Department, Siberian Research Institute of Geology, Geophysics and Mineral Raw Materials, 67, Krasny avenue, Novosibirsk, 630091, Russian Federation. SurninAI@rusgeology.ru

Natalya V. Guseva, Dr. Sc., Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. GusevaNV@tpu.ru

Received: 26.02.2025

Revised: 26.05.2025

Accepted: 16.06.2025

УДК 553.3.072
DOI: 10.18799/24131830/2025/7/5088
Шифр специальности ВАК: 1.6.10
Научная статья

Структурно-метасоматическая модель медно-порфирового рудного поля Актогай по материалам дистанционных съемок (северо-восточное Прибалхашье)

Ф.Е. Сейров✉, Ю.С. Ананьев

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск

✉fes2@tpu.ru

Аннотация. Актуальность. В настоящее время основным источником меди и некоторых благородных металлов являются месторождения медно-порфирового типа. Согласно современным представлениям, такие месторождения формировались в надсубдукционных условиях в пределах базальтоидных и андезитоидных вулcano-плутонических поясов. Подобные геодинамические обстановки установлены и в Центральной Азии. Актогайское рудное поле, расположено в пределах Жонгаро-Балхашского вулcano-плутонического пояса (ВПП) позднепалеозойского возраста. Месторождения рудного поля были разведаны в 70–80 гг. прошлого века, а их разработка началась только несколько лет назад. Практически не нарушенные ландшафты (в отношении съемок ASTER), высокая степень обнаженности и засушливые климатические условия позволяют сформировать на основе Актогайского рудного поля эталонную структурно-метасоматическую модель медно-порфировых систем по материалам дистанционных космических съемок. **Цель.** Выявление рудоконтролирующих структур и околорудных метасоматитов медно-порфировых месторождений рудного поля Актогай. **Методы.** Исходными материалами послужили данные космических съемок ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) и Landsat-8. Для выявления структурных закономерностей также использована цифровая модель рельефа SRTM (Shuttle Radar Topography Mission). Для выявления околорудных метасоматитов использованы методы космической инфракрасной спектроскопии – искусственных цветов, минеральных индексов и главных компонент, которыми выявлялись характеристические полосы поглощения минералов гидротермалитов. **Результаты.** В структурном плане околорудные метасоматиты и оруденение контролируются зонами сопряжения продольных и поперечных разломов по отношению к простиранию Баканас-Алакольского сегмента Жонгаро-Балхашского вулcano-плутонического пояса. По результатам обработки и дешифрирования выявлены зонально расположенные пропилиты, аргиллизиты и филлизиты. Показана пространственная связь выявленных филлизитов и аргиллизитов с рудными штокверками месторождений рудного поля.

Ключевые слова: Актогай, Жонгаро-Балхашский пояс, медно-порфировые месторождения, дистанционные методы, метасоматическая зональность, Aster, Landsat-8

Для цитирования: Сейров Ф.Е., Ананьев Ю.С. Структурно-метасоматическая модель медно-порфирового рудного поля Актогай по материалам дистанционных съемок (северо-восточное Прибалхашье) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 7. – С. 197–209. DOI: 10.18799/24131830/2025/7/5088

UDC 553.3.072
DOI: 10.18799/24131830/2025/7/5088
Scientific paper

Structural-metasomatic model of the Aktogai porphyry copper ore field based on remote sensing (north-eastern Balkhash region)

F.E. Seirov✉, Yu.S. Ananyev

National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

✉fes2@tpu.ru

Abstract. Relevance. Currently, the main source of copper and some precious metals are porphyry copper deposits. According to modern concepts, such deposits were formed in suprasubduction conditions within basaltoid and andesitoid volcano-plutonic belts. Similar geodynamic settings have been established in Central Asia. The Aktogay ore field is located within the Zhongaro-Balkhash volcano-plutonic belt of the Late Paleozoic age, within which other porphyry copper objects are localized. The ore field deposits were explored in the 70–80s of the last century, and their development began only a few years ago. Virtually undisturbed landscapes (in relation to ASTER surveys), a high degree of outcrop and arid climatic conditions make it possible to form a reference exploration model of porphyry copper systems based on remote sensing data from space on the basis of the Aktogay ore field. **Aim.** Identification of ore-controlling structures and wallrock metasomatites of porphyry copper deposits of the Aktogay ore field. **Methods.** The source materials were the data of space surveys ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) and Landsat-8. To identify structural patterns, the digital elevation model SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) was also used. To identify wallrock metasomatites, the authors used the methods of space infrared spectroscopy – artificial colors, mineral indices and main components, which revealed characteristic absorption bands. **Results.** Structurally, wallrock metasomatites and mineralization are controlled by the conjugation zones of longitudinal and transverse faults in relation to the strike of the Bakanas-Alakol segment of the Zhongaro-Balkhash volcano-plutonic belt. Based on the results of processing and decoding, the authors identified zonally located propylites, argillizites and phyllisites. The paper demonstrates the spatial relationship of the identified phyllisites and argillizites with ore stockworks of the ore field deposits.

Keywords: Aktogay, Zhongaro-Balkhash belt, porphyry copper deposits, remote sensing methods, metasomatic zoning, Aster, Landsat-8

For citation: Seirov F.E., Ananyev Yu.S. Structural-metasomatic model of the Aktogai porphyry copper ore field based on remote sensing (north-eastern Balkhash region). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 7, pp. 197–209. DOI: 10.18799/24131830/2025/7/5088

Введение

Месторождения медно-порфирового типа представляют собой центральные части гидротермально-метасоматических систем. Главными отличительными признаками от других типов является их связь с порфировыми интрузивами гранитоидного состава и специфическая метасоматическая зональность [1, 2]. Рудно-магматические системы (РМС) порфировых месторождений формируются в надсубдукционных обстановках в пределах базальтоидных и андезитовидных вулканоплутонических поясов (ВПП). Большая часть известных на данный момент медно-порфировых месторождений располагается в ВПП Тихоокеанского побережья Северной и Южной Америки, Восточной Азии. Также в литературе подробно описаны продуктивные ВПП Центральной Азии, Ближнего Востока и Балкан [3–6]. В настоящее время больше половины мировых запасов меди приходится на месторождения медно-порфирового типа. Помимо меди, из месторождений данного типа также нередко извлекаются редкоземельные элементы, золото, серебро, молибден и некоторые другие [7]. В России как наиболее перспективные на обнаружение медно-порфировых систем оцениваются территории ВПП Южного Урала, Алтая и в большей степени Дальнего Востока России [1]. Одним из ближайших продуктивных ВПП является позднепалеозойский Прибалхашско-Илийский пояс, в пределах которого расположены месторождения Акчатау, Коунрад, Актогай, Айдарлы, Кызылкия.

В целом способы выявления потенциально рудоносных площадей, являющихся перспективными

для обнаружения медно-порфирового оруденения, в общих чертах изучены [8–17] на примере рудных районов Невады, Тихоокеанского побережья Южной Америки, вулканоплутонических поясов Ирана. При этом, как правило, отмечается, что наиболее подходящими условиями для применения дистанционных методов являются засушливый пустынный и полупустынный климат с небольшим количеством растительности и слабо расчленённым рельефом. В связи с этим изучение объектов, расположенных в Прибалхашско-Илийском ВПП, может быть перспективным с методической точки зрения. С одной стороны, эти объекты расположены в условиях, которые могут быть оценены как крайне благоприятные для применения данных дистанционного зондирования (ДДЗ), и обобщённая модель, полученная с их использованием, будет наиболее полной. С другой стороны, географическая близость, схожесть геотектонических обстановок с продуктивными ВПП России позволяет оценивать полученную методику дешифрирования спектрозональных снимков как перспективную для прогнозирования РМС медно-порфирового типа в Алтае-Саянской складчатой области.

Краткая геологическая характеристика Прибалхашско-Илийского вулканоплутонического пояса и Актогайского рудного поля

Актогайское рудное поле расположено в Баканас-Алакольском сегменте фронтальной области Прибалхашско-Илийского окраинно-континентального ВПП [18]. В развитии пояса выделяют два этапа: первый –

средне-позднекаменноугольный, второй – пермский. В ходе первого этапа сформировались вулканогенные толщи андезит-дацит-риолитового состава, которые в более позднем этапе перекрываются вулканитами дацит-риолитового состава и локально прорываются интрузивными образованиями преимущественно гранитного и гранодиоритового состава [19].

В пределах ВПП стратифицированные комплексы представлены преимущественно позднепалеозойскими осадочными вулканогенными толщами кислого и среднего составов. В западной части отмечается значительное количество силурийских терригенных образований, представленных по большей части песчаниками и алевритами. В непосредственной близости от Актотайского рудного поля преобладают позднепалеозойские вулканогенно-осадочные образования смешанного, пре-

имущественно основного состава. Интрузивные образования ВПП в основном представлены изометричными либо вытянутыми в направлении простирания ВПП телами гранитов и гранодиоритов позднепалеозойского возраста. В пределах пояса разрывная тектоника представлена протяжёнными разломами преимущественно восточного северо-западного простирания и секущими их более мелкими разломами, также отмечается ряд синклиналий и антиклиналий ориентированных по простиранию пояса [20, 21].

Актотайское рудное поле расположено в юго-восточной части Баканосского синклинария. В рудное поле объединены месторождения Актотай в центральной части поля, Айдарлы в северо-западной и Кызылкия в северо-восточной, а также ряд мелких рудопроявлений (рис. 1).

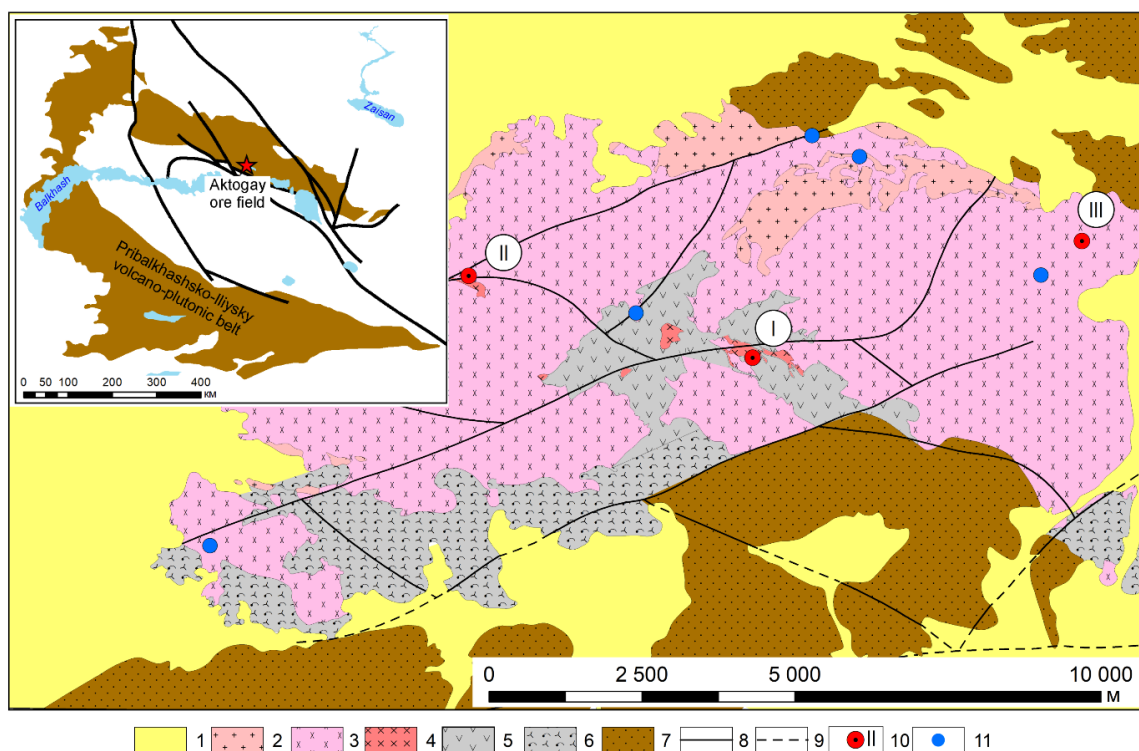


Рис. 1. Схема геологического строения рудного поля Актотай по [22] с изменениями и дополнениями от авторов: 1 – четвертичные отложения; 2 – граниты мелко- и среднезернистые позднекаменноугольного интрузивного комплекса; 3 – диориты и гранодиоры позднекаменноугольного интрузивного комплекса; 4 – дайки гранодиорит-порфиров позднекаменноугольного интрузивного комплекса; 5 – нерасчленённые вулканогенные породы преимущественно андезитового и андезидацитового состава кергетасской свиты (C₂₋₃); 6 – ингимбриты и туфы сложного состава кергетасской свиты (C₂₋₃); 7 – песчаники, алевриты, а также вулканогенно-осадочные породы колдарской свиты (C₃-P₁); 8 – разрывные нарушения, выходящие на поверхность; 9 – разрывные нарушения под четвертичными образованиями; 10 – известные месторождения: I – Актотай, II – Айдарлы, III – Кызылкия; 11 – рудопроявления

Fig. 1. Scheme of the geological structure of the Aktogay ore field based on [22] with modifications and additions from the authors: 1 – Quaternary deposits; 2 – fine- and medium-grained granites of the Late Carboniferous intrusive complex; 3 – diorites and granodiorites of the Late Carboniferous intrusive complex; 4 – granodiorite-porphyry dikes of the Late Carboniferous intrusive complex; 5 – undifferentiated volcanic rocks of mainly andesite and andesitic composition of the Keregetas suite (C₂₋₃); 6 – ingimbrites and tuffs of complex composition of the Keregetas suite (C₂₋₃); 7 – sandstones, siltstones, and volcanogenic-sedimentary rocks of the Koldar suite (C₃-P₁); 8 – faults outcropping on the surface; 9 – faults beneath Quaternary formations; 10 – deposits: I – Aktogay, II – Aidarly, III – Kyzylkia; 11 – ore occurrences

Границами поля служат экзоконтакты Колдарского интрузивного массива с образованиями среднего и позднего карбона, представляющими собой рудовмещающую вулканогенную часть комплекса и относящуюся к андезит-дацит-молассовой формации, в состав которой входят преимущественно андезиты и андезибазальты, их субвулканические и жерловые тела, туфы и туффиты этого же состава, а также субвулканические тела дацитовых и риолит-дацитовых порфиров. Обнаженная часть массива фиксирует присводовую часть Колдарской горст-антиклинали, крылья которой сложены вулканогенно-осадочными и вулканогенными образованиями позднего карбона и ранней-средней перми. Колдарский массив имеет форму лакколита, в составе которого выделяют три фазы: первая – габбро-диориты, габбро-долериты, диориты, гранодиориты; вторая – граниты биотитовые; третья – граниты порфиоровидные, гранит-порфиры. Строение участка во многом обусловлено расположением зоны разрывных нарушений, главными разломами являются Главный Колдарский и Южный Колдарский разломы северо-восточного направления, в непосредственной близости от центра участка они сопрягаются с Актогайским разломом [22].

На месторождении выделены полнопроявленные метасоматиты как щелочной, так и кислотной стадии [22, 23]. Фронтальная зона объединяет области развития биотит-хлорит-эпидотовых пропилитов. Интенсивность проявления метасоматических изменений фронтальной зоны наибольшая в диоритах и роговиках и меньшая в гранодиоритах. Рудная минерализация пропилитов представлена преимущественно редкими магнетитом и пиритом. Метасоматиты этой зоны занимают обширные площади по периферии рудных зон и редко входят в контуры промышленно значимой минерализации. Промежуточная зона представлена филлизитовыми и аргиллизитовыми изменениями кислотной стадии гидротермального процесса и проявлена локально по периферии рудных зон и частично входящих в её контур. Рудная минерализация представлена в основном халькопиритом, в меньшей степени магнетитом. В тыловых зонах известных проявлений отмечается окварцевание и калишпатизация как по породной массе, так и в виде кварц-микроклиновых прожилков, количество которых увеличивается в направлении от фронтальных зон к тыловым. Среди рудных минералов тыловой зоны преобладает борнит, реже встречаются халькозин и халькопирит.

Исходные материалы и их предварительная обработка

В работе используются материалы съёмки Landsat-8, ASTER, SRTM, а также опубликованные геологические материалы по рудному полю. Мате-

риалы дистанционных съёмок получены с сайта геологического общества США [24].

Спектрональные снимки ASTER содержат каналы в трёх спектральных диапазонах – видимый и ближний инфракрасный диапазон (visible and near infrared radiation – VNIR) – 3 канала с пространственным разрешением 15 м, коротковолновой ИК (shortwave infrared radiation – SWIR) – 6 каналов с пространственным разрешением 30 м, и тепловой ИК (thermal infrared radiation – TIR) – 5 каналов с разрешением 90 м. В работе использован снимок AST_L1T_00308142004054309_20150505155841_16754. В материалах Landsat-8 содержатся диапазоны VNIR – 5 каналов с разрешением 30 м, SWIR – 3 канала с разрешением 30 м, TIR – 2 канала с разрешением 100 м и панхроматическая полоса в видимом диапазоне с разрешением 15 м. Обработывался и анализировался снимок LC08_L2SP_149027_20130822_20200912_02_T1.

Первичная обработка снимков ASTER производилась с использованием радиометрической калибровки снимков [25–27] и атмосферной коррекции (модель FLAASH) [25]. Подготовка данных Landsat заключалась в извлечении моноканальных растров из архива и создании мультиспектрального растра. Данные SRTM обрабатывались с использованием отмывки рельефа и направленной дифференциации.

Методы работы со снимками

Для выявления на территории Актогайского рудного поля разрывных нарушений использовался весь набор растровых данных – ASTER, Landsat, SRTM. Разрывные нарушения проявлены в материалах Landsat-8 в виде линейных зон, по обе стороны которых наблюдается смена текстуры изображения, вдоль них происходит смещение тел стратиграфических подразделений. В цифровых моделях рельефа и в результатах их дифференцирования разрывным нарушениям, как правило, соответствуют линейные градиентные зоны, которые подчёркиваются крутыми склонами, а также нарушениями сплошности и смещения элементов рельефа – бортов долин, хребтов и прочего.

Выявление метасоматически изменённых пород в материалах дистанционного зондирования основывается на особенностях различных минералов к отражению и поглощению в различных частях спектра электромагнитного излучения. Наличие в спектрах ASTER характеристических полос поглощения групп Fe-Mg-OH, Al-OH, CO₃[–] и SiO₂ позволяет выявлять некоторые минералы метасоматитов – эпидот, хлорит, кальцит, мусковит, серицит, каолинит, кварц и другие.

На рис. 2 показаны спектральные кривые основных минералов филлизитов, аргиллизитов и пропилитов [26].

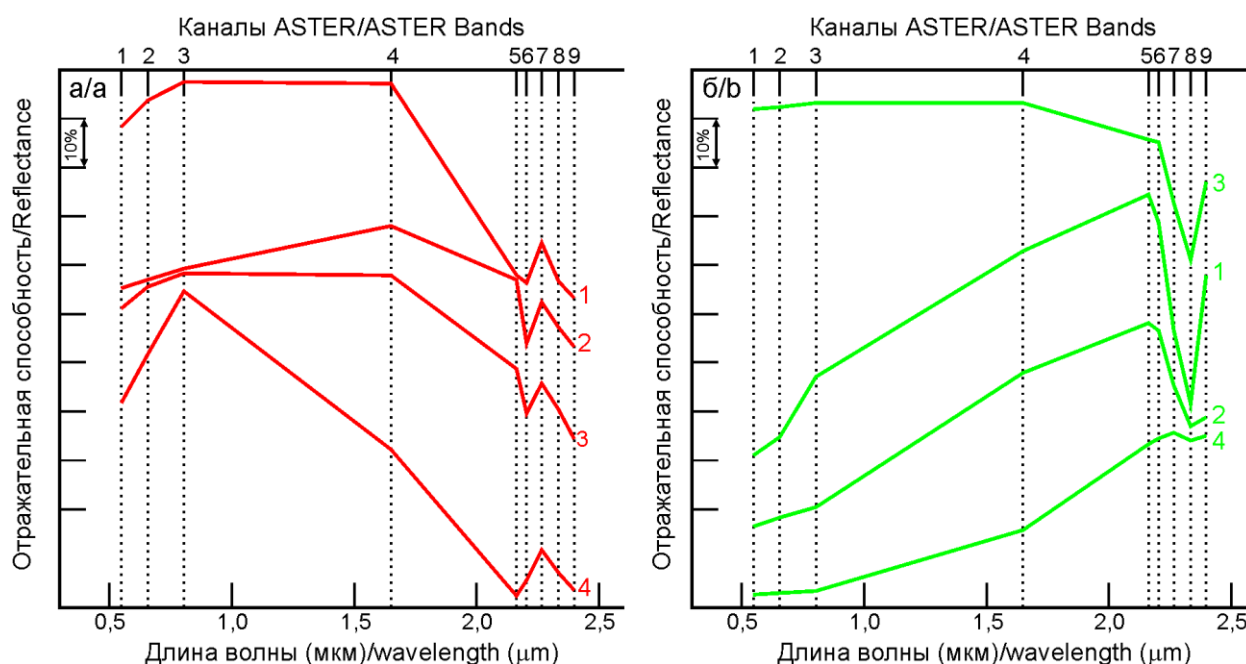


Рис. 2. а) спектры некоторых минералов, характерных для филлизитов и аргиллизитов во VNIR-SWIR диапазонах ASTER; 1 – каолинит, 2 – мусковит (серицит), 3 – монтмориллонит, 4 – алунит; б) спектры некоторых минералов, характерных для пропилитов во VNIR-SWIR диапазонах ASTER; 1 – эпидот, 2 – хлорит, 3 – кальцит, 4 – биотит

Fig. 2. а) spectra of some minerals characteristic of the phyllisite and argillizite in the VNIR-SWIR ranges of ASTER; 1 – kaolinite, 2 – muscovite (sericite), 3 – montmorillonite, 4 – alunite; б) spectra of some minerals characteristic of the propylite in the VNIR-SWIR ranges of ASTER; 1 – epidote, 2 – chlorite, 3 – calcite, 4 – biotite

Для выявления метасоматически измененных горных пород использовались методы искусственных цветов, минеральных индексов и главных компонент для SWIR диапазона снимков ASTER.

На начальных этапах работы применялся метод искусственных цветов. Для выявления характерных минералов метасоматитов использован композит 4, 6, 8 каналов в палитре RGB [27]. Этот композит позволяет определять области, содержащие глинистые минералы, серицит и мусковит по розовой и красной окраске пикселей ввиду высокой отражательной способности этих минералов в 4 канале и низкой в 6 и 8 (рис. 2), а также основные минералы пропилитов (эпидот и хлорит) по зеленой окраске в связи с их высоким отражением в 6 спектральном диапазоне и низким в 4 и 8 (рис. 3).

Метод спектральных индексов основан на подчеркивании характеристических полос поглощения минералов путем простейших алгебраических операций над значениями спектральных яркостей пикселей в различных спектральных диапазонах. В табл. 1 приведены некоторые минеральные индексы по материалам [28–31], которые были использованы при работе со спектрально-зональными снимками Aster.

Метод главных компонент служит для преобразования снимков с целью устранения корреляцион-

ной зависимости между исходными многомерными данными при одновременном сжатии большей части дисперсии полного изображения с последующим анализом матрицы собственных векторов [15] и геометризацией полученных результатов по площади рудного поля.

Аргиллизитовым и филлизитовым изменениям будет соответствовать компонента, у которой в матрице собственных векторов прослеживаются пониженные значения в 5 и 6 канале ASTER при высоких значениях в 4 и 7 (рис. 2, а), пропилитам будет отвечать компонента с наименьшим собственным значением 8 канала, при высоких значениях для 7 и 9 каналов (рис. 2, б).

Геологическая интерпретация комплекса полученных материалов сводилась к разбраковке и обобщению получаемых в ходе применения методов результатов при сопоставлении их с имеющимися геологическими данными.

Полученные результаты

Структурный анализ. Разрывные нарушения можно эффективно выявить при совместном использовании данных дистанционных съемок и цифровой модели рельефа (ЦМР). Разрывные нарушения на снимках проявляются в рельефе по прямым и косвенным признакам.

Таблица 1. Минеральные индексы, использованные для выявления основных разновидностей метасоматитов по материалам ASTER

Table 1. Mineral indices used to identify the main varieties of metasomatites based on ASTER materials

Индекс Index	Формула вычисления Calculation formula	Интерпретация/Interpretation
Филлизиты (кварц, серицит)/Phyllic (quartz, sericite)		
MI ³	$(\text{band12} \cdot \text{band14} \cdot \text{band14} \cdot \text{band14}) / (\text{band13} \cdot \text{band13} \cdot \text{band1} \cdot \text{band13})$	Участки окварцевания, основность горных пород Silicification areas, mafic rocks
Fillit	$(\text{band5} + \text{band7}) / \text{band6}$	Филлитовый индекс. Слюдистые минералы (преимущественно серицит) Phyllite index. Mica minerals (mainly sericite)
Аргиллизиты (каолинит, монтмориллонит, иллит, смектит, алуниит, кварц, серицит) Argillic (kaolinite, montmorillonite, illite, smectite, alunite, quartz, sericite)		
KLI	$(\text{band4} / \text{band5}) \cdot (\text{band8} / \text{band6})$	Каолинит/Kaolinite
OHI	$(\text{band7} / \text{band6}) \cdot (\text{band4} / \text{band6})$	ОН-содержащие минералы (гидрослюды) OH-bearing minerals
Пропилиты (эпидот, хлорит, амфибол, кальцит)/Propylitic (epidote, chlorite, amphibole, calcite)		
Amf±MgOH	$(\text{band6} + \text{band9}) / \text{band8}$	Амфибол, MgOH-содержащие минералы (эпидот, хлорит) Amphibole, MgOH-bearing minerals (epidote, chlorite)
RBD8	$(\text{band7} + \text{band9}) / \text{band8}$	Эпидот±хлорит±карбонат Epidote±chlorite±carbonate
MgOH	$\text{band7} / \text{band8}$	MgOH-содержащие минералы (эпидот, хлорит) MgOH-bearing minerals (epidote, chlorite)
Ep±Chl±Amf	$(\text{band6} + \text{band9}) / (\text{band7} + \text{band8})$	Эпидот±хлорит±амфибол Epidote±chlorite±amphibole
CLI	$(\text{band6} / \text{band8}) \cdot (\text{band9} / \text{band8})$	Кальцит/Calcite

К прямым признакам можно отнести смещения, вдоль которых происходят нарушения сплошности выявляемых в ходе работы линеаментов, отвечающих геологическим объектам – это могут быть как границы породных комплексов, так и элементы внутреннего строения, например, слоистость в осадочных породах. Косвенные признаки разрывных нарушений – им могут соответствовать линеаменты, отвечающие протяженным узким зонам понижений или смещений в рельефе. Как правило, линеаменты, потенциально отвечающие разрывным нарушениям выявляются по смене текстуры растрового изображения по обе стороны разрывного нарушения.

В результате анализа цифровой модели рельефа в комплексе со спектральными данными было установлено положение разломов.

По ориентировке разрывных нарушений можно выделить три группы:

- 1) разломы запад-северо-западного и северо-западного простирания, продольные по отношению к Баканас-Алакольскому сегменту Прибалхашско-Илийского ВПП, самые протяженные из представленных. Прослеживаются на десятки и первые сотни км. В пределах рудного поля отдельные сегменты этих разломов, ограниченные ортогональными нарушениями, прослеживаются в районах штокверков месторождений Актогай, Айдарлы, Кызылкия;
- 2) разломы северо-восточного простирания прослеживаются по всей территории Актогайского рудного поля. По отношению к Баканас-Алакольскому сегменту Прибалхашско-Илийского ВПП имеют поперечное простирание.

Их протяженность может достигать первых десятков км. Рудные штокверки месторождений Актогай, Айдарлы и Кызылкия сопряжены с этими разрывами;

- 3) разломы северо-северо-западного и субмеридионального простирания, диагональные по отношению к Баканас-Алакольскому сегменту Прибалхашско-Илийского ВПП. По распространённости в пределах поля являются самыми редкими и занимают преимущественно периферийные части поля. Единичные разломы этого типа прослеживаются на удалении около 1 км от месторождения Айдарлы.

Как видно из полученной структурной схемы (рис. 3), медно-порфировые месторождения Актогайского рудного поля располагаются в зонах сопряжения продольных и поперечных разломов к Баканас-Алакольскому сегменту Прибалхашско-Илийского ВПП.

Метасоматиты, выявляемые в материалах дистанционных съёмок околорудные метасоматически изменённые породы Актогайского рудного поля, представлены тремя разновидностями – филлизиты, аргиллизиты и пропилиты.

В искусственных цветах композит из полос 4, 6, 8 SWIR диапазона ASTER (рис. 3) в палитре RGB позволяет выявлять глинистые минералы, серицит и мусковит по оттенкам красного и розового цвета, поскольку эти минералы имеют наибольшее отражение в 4 канале и сравнительно невысокое в 6 и 8. Пропилиты в этом композите будут иметь зеленоватые оттенки, поскольку минералы этих метасоматитов имеют высокое отражение в 6 и существенно более низкое в 4 и 8.

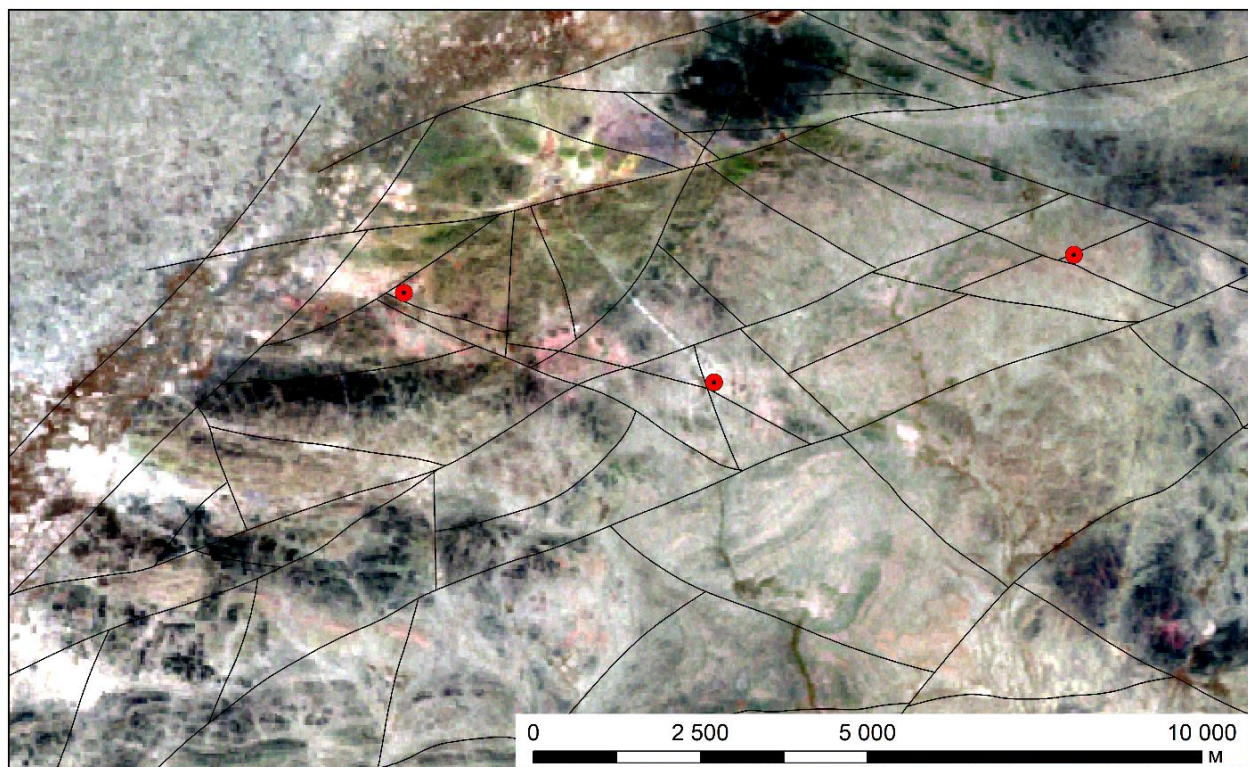


Рис. 3. Положение разломов Актогайского рудного поля на подложке информативного композита 4, 6, 8 каналов ASTER. Черные линии – разрывные нарушения, выделенные по результатам дешифрирования

Fig. 3. Position of the faults of the Aktogay ore field on the base of the informative composite of 4, 6, 8 ASTER channels. Black lines are faults identified based on the results of interpretation

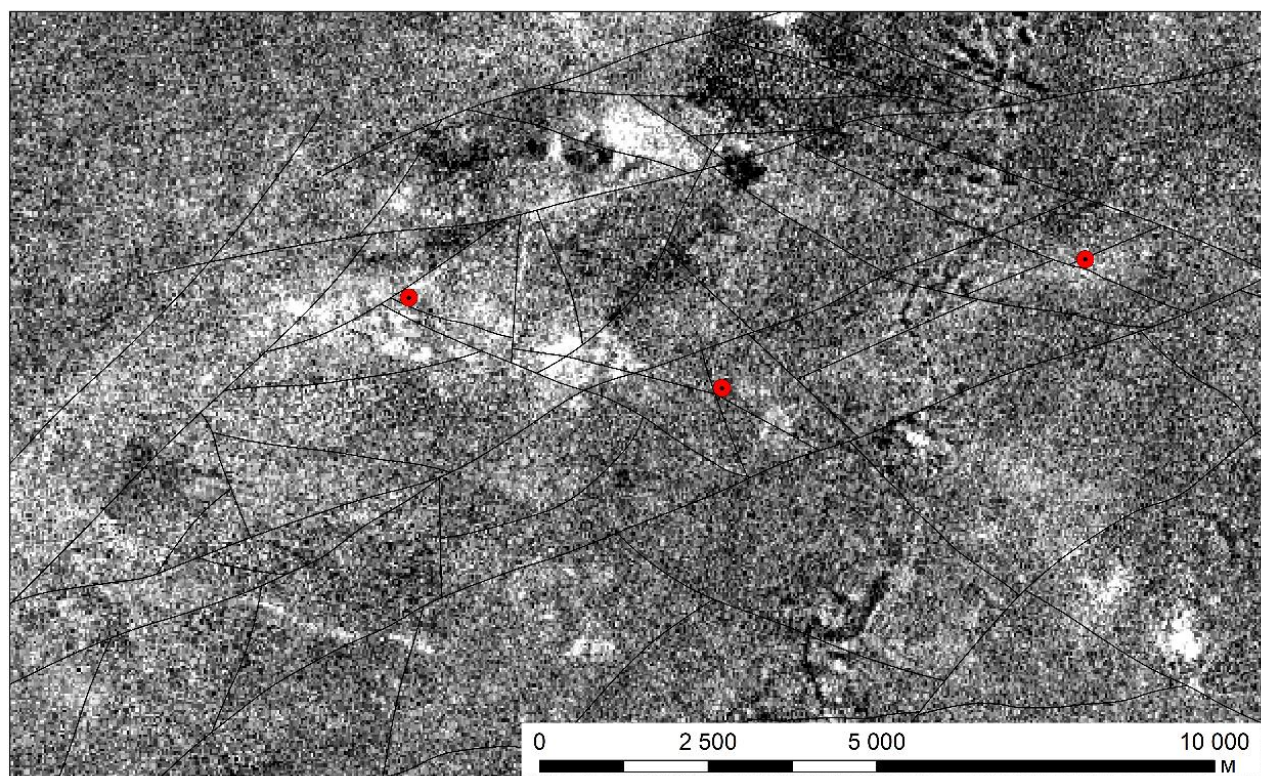


Рис. 4. Индекс ОНІ. Белые пиксели соответствуют породам, обогащенным ОН-содержащими минералами

Fig. 4. OHI index. White pixels correspond to rocks enriched in OH-containing minerals

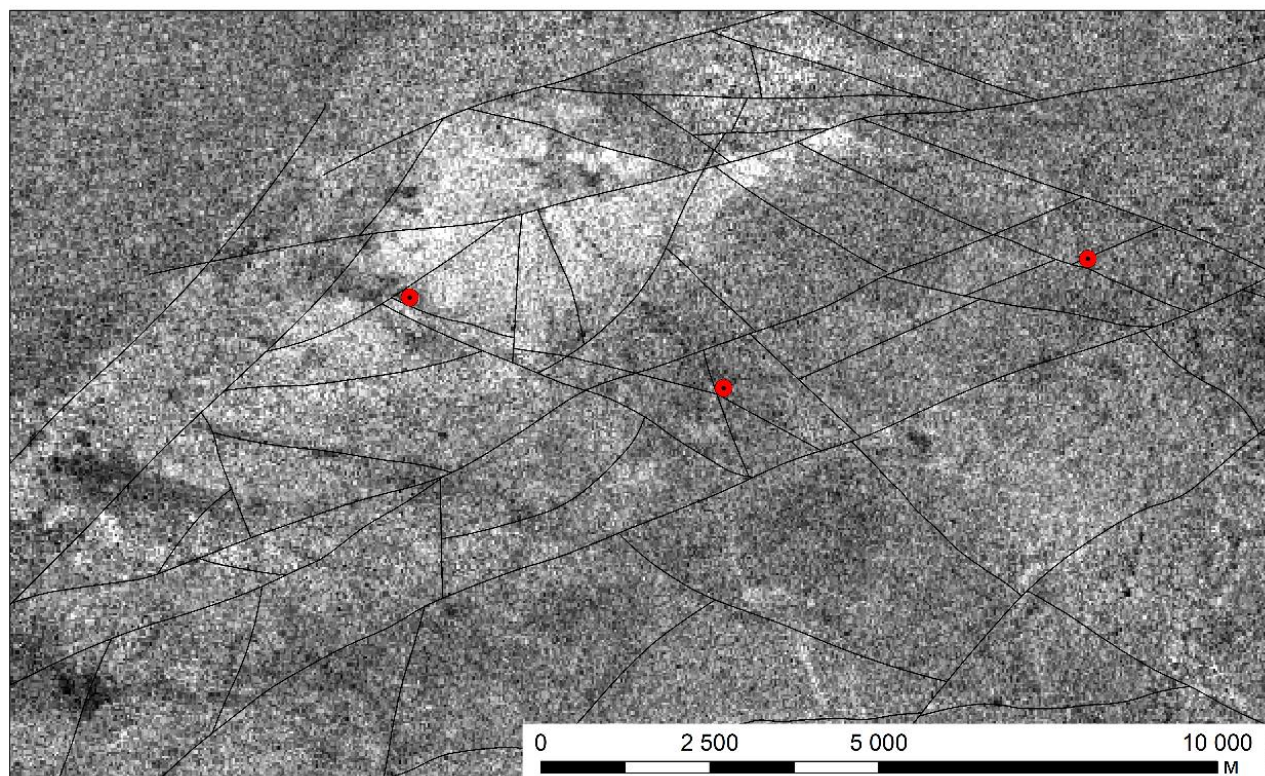


Рис. 5. Индекс RBD8. Белые пиксели соответствуют породам, обогащенным эпидотом, хлоритом, карбонатом
Fig. 5. RBD8 index. White pixels correspond to rocks enriched in epidote, chlorite, carbonate

Как видно из рис. 4, розоватые области располагаются в зонах влияния разрывных нарушений северо-западной ориентировки, особенно на участке между месторождениями Актогай и Айдарлы, а также вблизи месторождения Кызылкия. На севере рудного поля наблюдается область в зеленоватых тонах восточнее месторождения Айдарлы размерами более 4–5 км, а также ряд более мелких зеленоватых проявлений ближе к центральной части поля вблизи месторождения Актогай.

В минеральных индексах положение кварцсерицитовых метасоматитов (филлизитов) фиксируется значимыми величинами филлитового индекса, индекса ОН-содержащих минералов (рис. 4), индекса MI^3 . Положение аргиллизитов фиксируется значимыми величинами каолинитового и ОН-содержащих минералов индексов. Пропилиты про-

являются в значимых величинах индексов амфибола $\pm MgOH$, эпидот $\pm$ хлорит $\pm$ амфибола, эпидот $\pm$ хлорит $\pm$ карбонат (рис. 5), $MgOH$ -содержащих минералов, индекса кальцита.

Метод главных компонент позволяет определять положение филлизитовых и пропилитовых метасоматитов. Матрица собственных векторов для главных компонент, рассчитанных по SWIR диапазону снимка ASTER, приведена в табл. 2.

Как видно из матрицы собственных векторов, третья компонента отвечает наименьшему отражению в 5 канале при близких высоких значениях в 7 и 8 каналах. Четвёртая компонента фиксирует наименьшее отражение в 6 канале и понижение в 8 при явно высоком значении в 7 канале. Шестая компонента имеет наибольшее отражение в 7 и 9 каналах и минимальное значение в 8 канале.

Таблица 2. Матрица собственных векторов

Table 2. Matrix of eigenvectors

Каналы Bands	Главные компоненты/Principal components					
	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6
4	0,87506	0,48304	0,01991	0,00454	0,02081	0,00941
5	0,26806	-0,47057	-0,73530	0,29865	0,27553	0,03062
6	0,26615	-0,45040	-0,07901	-0,70211	-0,46803	-0,08973
7	0,23435	-0,43694	0,44969	0,54610	-0,40008	0,30602
8	0,16740	-0,32440	0,41083	0,04044	0,41604	-0,72335
9	0,09290	-0,21501	0,28581	0,34345	0,60947	0,61159

Интерпретировать результат можно следующим образом: третья компонента отвечает преимущественно глинистым минералам и выявляет области распространения современных отложений и русловой аллювий. Четвёртая компонента в значительно большей степени соответствует породным комплексам и отвечает породам, содержащим серицит.

Эти образования на рассматриваемой территории представлены филлизитами по диоритам, гранодиоритам и более кислыми разностями, проявленными в виде протяжённых тел с шириной выходов, не превышающей первых километров. Шестая компонента отвечает в большей степени пропилитам, поскольку имеет более характерную полосу поглощения в 8 канале, что свойственно для хлорита, эпидота, амфиболов, кальцита. Тем не менее шестая компонента может представлять собой лишь шумовую характеристику спектрозонального изображения, поэтому в данном случае сама по се-

бе не может рассматриваться как надежное средство интерпретации метасоматитов пропилитового профиля. Остальные компоненты (PC1, PC2, PC5) не имеют геологической интерпретации.

На основании данных анализа SWIR диапазона снимка ASTER методами искусственных цветов, минеральных индексов и главных компонент для рудного поля Актогай разработана схема размещения метасоматически изменённых пород (рис. 6). Как видно из полученной схемы, для месторождений Актогайского поля характерна метасоматическая зональность, представленная тремя сменяющими друг друга от тыловых областей к фронтальным зонами – филлизитов, аргиллизитов и пропилитов. Таким образом, по результатам обработки и интерпретации SWIR и TIR диапазонов снимка ASTER в строении метасоматического ореола рудного поля Актогай можно выделить внутреннюю, промежуточную и внешнюю зоны.

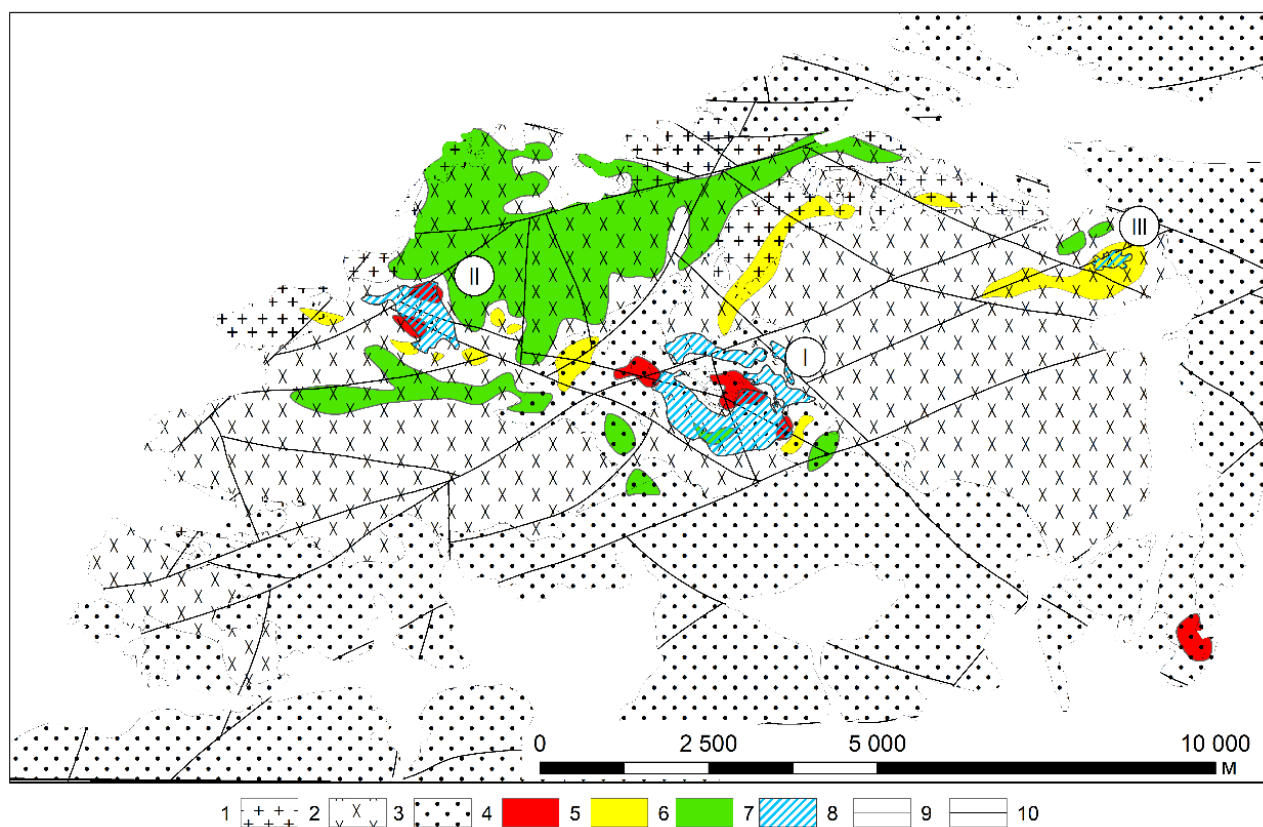


Рис. 6. Структурно-метасоматическая модель Актогайского рудного поля по результатам дешифрирования материалов Landsat-8 и ASTER: 1 – современные аллювиальные образования, 2 – граниты мелко- и среднезернистые (Сз), 3 – диориты и гранодиориты (Сз), 4 – вмещающие вулканогенно-осадочные породы, 5 – метасоматиты внутренней зоны, 6 – метасоматиты промежуточной зоны, 7 – метасоматиты внешней зоны, 8 – положение рудных штоков: I – Актогай, II – Айдарлы, III – Кызылкия (по результатам геолого-разведочных работ), 9 – геологические границы, 10 – разрывные нарушения

Fig. 6. Structural-metasomatic model of the Aktogay ore field based on the results of Landsat-8 and ASTER data interpretation: 1 – modern alluvial formations, 2 – fine- and medium-grained granites (Cz), 3 – diorites and granodiorites (Cz), 4 – host volcanogenic-sedimentary rocks, 5 – metasomatites of the inner zone, 6 – metasomatites of the intermediate zone, 7 – metasomatites of the outer zone, 8 – position of ore stockworks: I – Aktogay, II – Aidarly, III – Kyzylkia (based on the results of geological exploration), 9 – geological boundaries, 10 – faults

Внутренняя зона проявлена в материалах ASTER характерными минимальными значениями в 5, 6 и 12 каналах и высокими значениями 4, 7, и 13, что выявляется в композите 4, 6, 8 в палитре RGB по красноватому оттенку. В минеральных индексах зоне соответствуют значимые величины MI^3 , Fillit, OHI. В методе главных компонент их положению частично отвечает 4 главная компонента.

Промежуточная зона проявлена полосой поглощения в 6 канале и высокими значениями в 4 и 7, что выявляется в композите 4, 6, 8 в палитре RGB по розоватому оттенку. В минеральных индексах зона выявляется по значимым величинам индексов KLI, OHI, Fillit. В методе главных компонент промежуточной зоне соответствует 4 компонента.

Внешняя зона проявлена характеристической полосой поглощения в 8 канале и высокими значениями в 7 и 9, что также выявляется в композите 4, 6, 8 в палитре RGB по зеленоватому оттенку. В минеральных индексах положение внешней зоны соответствует значимым величинам индексов $Amf \pm MgOH$, RBD8, $MgOH$, $Ep \pm Chl \pm Amf$, CLI.

Метасоматиты внутренней и промежуточной зон представляют собой изометричные тела размерами от 200 до 800 м. Метасоматиты промежуточных зон нередко имеют продолговатую форму, их размеры обычно не превышают 1 км, чаще около 400 м по удлинению. Наибольшую площадь занимают метасоматиты внешней зоны. Они располагаются в зоне от первых сотен метров от орудене-

ния до 5 км и имеют широкое распространение по периферии рудного поля, занимая первые десятки кв. км. Положение рудных штоков месторождений Актогай и Айдарлы пространственно частично совпадает с положением метасоматитов внутренней зоны, а штокверк месторождения Кызылкия лежит в области проявления метасоматитов промежуточной зоны.

Выводы

Таким образом, положение рудных штоков месторождений Актогай, Айдарлы и Кызылкия контролируется зонами сопряжения разломов запад-северо-западного простирания, продольных к простиранию Прибалхашско-Илийского ВПП и разломов северо-восточного простирания, поперечных по отношению к ВПП. Метасоматиты представлены тремя разновидностями, от тыловых областей до фронтальных – это филлизитовые, аргиллизитовые и пропилитовые. Положение рудных штоков соответствует положению выявляемых в дистанционных данных филлизитовых метасоматитов. Сопоставление выявленной метасоматической зональности с картой метасоматитов рудного поля Актогай показало весьма высокую сходимость. Методика комплексного анализа данных SWIR диапазона ASTER способами искусственных цветов, минеральных индексов и главных компонент является достаточной для выявления минеральных ассоциаций метасоматитов медно-порфировых месторождений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Звездов В.С. Модели меднопорфировых рудно-магматических систем и месторождений для прогноза, поисков и оценки: дис. ... д-ра геол.-минерал. наук. – М., 2022. – 553 с.
2. Lowell J.D., Guilbert J.M. Lateral and vertical alteration-mineralization zoning in porphyry ore deposits // *Economic Geology*. – 1970. – Vol. 65. – № 4. – P. 373–408. DOI: 10.2113/gsecongeo.65.4.373.
3. Porphyry copper formation driven by water-fluxed crustal melting during flat-slab subduction / T. Lamont, M. Loader, N. Roberts, F. Cooper, J. Wilkinson, D. Bevan, A. Gorecki, A. Kemp, T. Elliott, N. Gardiner, S. Tapster // *Nature Geoscience*. – 2024. – Vol. 17. – P. 1306–1315. DOI: 10.1038/s41561-024-01575-2.
4. Звездов В.С., Куликов Д.А. Вулкано-плутонические пояса и медно-порфировые системы Новой Гвинеи: обстановки формирования и металлогения // *Отечественная геология*. – 2024. – № 6. – С. 20–50. – DOI: 10.47765/0869-7175-2024-10028.
5. Звездов В.С. Влияние геотектонических обстановок формирования вулкано-плутонических поясов на металлогению медно-порфировых рудных районов и узлов // *Отечественная геология*. – 2024. – № 5. – С. 54–70. DOI: 10.47765/0869-7175-2024-10023.
6. О перспективах открытия новых золото-медно-порфировых месторождений малмыжского типа на территории Нижнего Приамурья (Дальний Восток, Россия) / О.В. Петров, В.В. Шатов, А.И. Ханчук, В.В. Иванов, Ю.П. Змиевский, В.И. Шпикерман, Е.О. Петров, В.В. Снежко, А.В. Шманяк, А.В. Молчанов, В.О. Халенев, Н.В. Шатова, Н.В. Родионов, Б.В. Беляцкий, С.А. Сергеев // *Региональная геология и металлогения*. – 2023. – № 94. – С. 75–112. DOI: 10.52349/0869-7892_2023_94_75-112.
7. Гурман М.А., Корнеева С.И. Перспективы комплексной переработки первичной золото-медно-порфировой руды // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2024. – № 12. – С. 92–102. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_12_0_92.
8. Mapping hydrothermally altered rocks at Cuprite, Nevada, using the advanced spaceborne thermal emission and reflection radiometer (ASTER) – a new satellite-imaging system / L.C. Rowan, S.J. Hook, M.J. Abrams, J.C. Mars // *Economic Geology*. – 2003. – Vol. 98. – P. 1018–1027. DOI: 10.2113/gsecongeo.98.5.1019
9. Rowan L.C., Mars J.C. Lithologic mapping in the Mountain Pass, California area using Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) data // *Remote Sensing of Environment*. – 2003. – Vol. 84. – P. 350–366. DOI: 10.1016/s0034-4257(02)00127-x
10. Mars J.C., Rowan L.C. Regional mapping of phyllic- and argillic-altered rocks in the Zagros magmatic arc, Iran, using Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) data and logical operator algorithms // *Geosphere*. – 2006. – Vol. 2. – P. 161–186. DOI: 10.1130/GES00044.1

11. Utility of high-altitude infrared spectral data in mineral exploration – application to northern Patagonia Mountains, Arizona / B.R. Berger, T.V. King, L.C. Morath, J.D. Phillips // *Economic Geology*. – 2006. – Vol. 98. – P. 1003–1018. DOI: 10.2113/gsecongeo.98.5.1003
12. Kruse F.A. Use of Airborne Imaging Spectrometer data to map minerals associated with hydrothermally altered rocks in the northern Grapevine Mountains, Nevada and California // *Remote Sensing of Environment*. – 1988. – Vol. 24.1. – P. 31–51. DOI: 10.1016/0034-4257(88)90004-1
13. Pour A.B., Hashim M. The application of ASTER remote sensing data to porphyry copper and epithermal gold deposits // *Ore Geology Reviews* – 2012. – Vol. 44. – P. 1–9. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2011.09.009
14. Tommaso I.D., Rubinstein N. Hydrothermal alteration mapping using ASTER data in the infiernillo porphyry deposit, Argentina // *Ore Geology Reviews* – 2007. – Vol. 32 (1–2). – P. 275–290. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2006.05.004
15. Crosta A.P., McMoore J. Enhancement of Landsat Thematic Mapper imagery for residual soil mapping in SW Minas Gerais State, Brazil: a prospecting case history in greenstone belt terrain // *Proceedings of the 7th Thematic Conference on Remote Sensing for Exploration Geology*. – 1989. – P. 1173–1187.
16. Alteration zones detection using image-based and spectrum-based image processing techniques to Aster data: Sonajil copper deposit / N. Esmaeilzadeh, S. Barak, N.D. Gani, A. Imamalipour, M. Abedi, A.B. Pour // 2023 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. – Pasadena, CA, USA, 2023. – P. 3700–3703. DOI: 10.1109/IGARSS52108.2023.10281515.
17. From pixels to deposits: porphyry mineralization with multispectral convolutional neural networks / U. Zidan, H.A.E. Desouky, M.M. Gaber, M.M. // *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. – 2023. – Vol. 16. – P. 9259–9271. DOI: 10.1109/JSTARS.2023.3321714.
18. Мазуров А.К. Геодинамические обстановки формирования металлогенических комплексов Казахстана: дис. ... д-ра геол.-минерал. наук. – Кокшетау, 2003. – 329 с.
19. Современное состояние изученности геодинамики и металлогении Жонгаро-Балхашской складчатой системы / Э.Ю. Сейтмуратова, Я.К. Аршамов, Р.Т. Баратов, С. Бакдаuletкызы, Д.О. Даутбеков, Ж.И. Сатемирова // *Горный журнал Казахстана*. – 2015. – № 3. – С. 12–16. URL: <https://rucont.ru/efd/456880> (дата обращения 30.03.2025).
20. Геологическая карта: L-(43),(44) (Талды-Курган). Геологическая карта СССР. Геологическая карта, масштаб: 1:1000000 / под ред. Н.А. Афоничева. – СПб: ФГБУ «ВСЕГЕИ», 1974. – 354 с.
21. Бахтеев М.К. Палеозойские орогенные вулканоплутонические пояса. – М.: Недра, 1987. – 168 с.
22. Беспяев Х.А., Париллов Ю.С. Условия образования месторождений меди, свинца, цинка и железа Казахстана: (по результатам изучения флюидных включений). – Алматы: Гылым, 1998. – 352 с.
23. Особенности минерального и элементного состава бедных руд месторождений Актогай и Бозшаколь / А.А. Антоненко, Н.М. Жуков, Л.Е. Герцен, Т.В. Гойколова // *Изв. АН РК. Сер. геологии и технических наук*. – 2016. – № 4. – С. 18–27.
24. EarthExplorer // USGS science for a changing world. URL: <https://earthexplorer.usgs.gov/> (дата обращения: 10.04.2022).
25. Evaluation of ICA and CEM algorithms with Landsat-8/ASTER data for geological mapping in inaccessible regions / A.B. Pour, Y. Park, S. Park Tae-Yoon, J.K. Hong, M. Hashim, J. Woo, I. Ayoobi // *Geocarto International*. – 2018. – Vol. 34. – P. 1–64. DOI: 10.1080/10106049.2018.1434684.
26. USGS Spectral library version7: U.S. Geological Survey Data Series 1035 / R.F. Kokaly, R.N. Clark, G.A. Swayze, K.E. Livo, T.M. Hoefen, N.C. Pearson, R.A. Wise, W.M. Benz, H.A. Lowers, R.L. Driscoll, A.J. Klein. – 2017. – 61 p.
27. Abrams M., Hook S., Ramachandran B. ASTER User Handbook, v2: Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer. – Pasadena: Jet Propulsion Laboratory, 2002. – 135 p.
28. Seamless geological map generation using ASTER in the Broken Hill Curnamona province of Australia / R.D. Hewson, T.J. Cudahy, S. Mizuhiko, K. Ueda, A.J. Mauger // *Remote Sensing of Environment*. – 2005. – Vol. 99 (1–2). – P. 159–172. DOI: 10.1016/j.rse.2005.04.025.
29. Ninomiya Y., Fu B., Cudahy T.J. Detecting lithology with Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) multispectral thermal infrared «radiance-at-sensor» data // *Remote Sensing of Environment*. – 2005. – Vol. 99. – P. 127–139. DOI: 10.1016/j.rse.2005.06.009.
30. Ninomiya Y. A Stabilized Vegetation Index and Several Mineralogic Indices Defined for ASTER VNIR and SWIR Data // *Proc. of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. – Toulouse, France, 21–25 July 2003. – Vol. 3. – P. 1552–1554.
31. Ready P.J., Wintz P.A. Information extraction, SNR improvement, and data compression in multispectral imagery // *IEEE Trans. Commun.* – 1973. – Vol. 21. – P. 1123–1130.

Сведения об авторах

Федор Евгеньевич Сейров, аспирант отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. fes2@tpu.ru

Юрий Сергеевич Ананьев, доктор геолого-минералогических наук, доцент отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. ananeyevys@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0074-5980>

Поступила в редакцию: 04.04.2025

Поступила после рецензирования: 05.05.2025

Принята к публикации: 16.06.2025

REFERENCES

1. Zvezdov V.S. *Models of copper porphyry ore-magmatic systems and deposits for forecasting, prospecting and evaluation*. Dr. Diss. Moscow, 2022. 553 p. (In Russ.)
2. Lowell J.D., Guilbert J.M. Lateral and vertical alteration mineralization zoning in porphyry ore deposits. *Econ. Geol.*, 1970, vol. 65, pp. 373–408.
3. Lamont T.N., Loader M.A., Roberts N.M.W. Porphyry copper formation driven by water-fluxed crustal melting during flat-slab subduction. *Nat. Geosci.*, 2024, vol. 17, pp. 1306–1315. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41561-024-01575-2>.
4. Zvezdov V.S., Kulikov D.A. Volcano-plutonic belts and porphyry copper systems of New Guinea: Formation environments and metallogeny. *Domestic geology*, 2024, vol. 6, pp. 20–50. (In Russ.) DOI: 10.47765/0869-7175-2024-10028.
5. Zvezdov V.S. The effect of the geotectonic settings of volcano-plutonic belts on the metallogeny of the porphyry copper ore regions and clusters. *Domestic geology*, 2024, vol. 5, pp. 54–70. (In Russ.) DOI: 10.47765/0869-7175-2024-10023.
6. Petrov O.V., Shatov V.V., Khanchuk A.I., Ivanov V.V., Zmievskiy Yu.P., Shpikerman V.I., Petrov E.O., Snezhko V.V., Shmanyak A.V., Molchanov A.V., Khalenev V.O., Shatova N.V., Rodionov N.V., Belyatskiy B.V., Sergeev S.A. On the prospects for the discovery of new Malmyzh-type gold-copper-porphyry deposits in the Lower Amur region (Far East, Russia). *Regional geology and metallogeny*, 2023, vol. 94, pp. 75–112. DOI: 10.52349/0869-7892_2023_94_75-112 (In Russ.)
7. Gurman M.A., Korneeva S. I. Prospects of integrated processing of primary gold-bearing porphyry copper ore. *Mining Inf. Anal. Bull.*, 2024, vol. 12, pp. 92–102. (In Russ.) DOI: 10.25018/0236_1493_2024_12_0_92.
8. Rowan L.C., Hook S.J., Abrams M.J., Mars J.C. Mapping hydrothermally altered rocks at Cuprite, Nevada, using the advanced spaceborne thermal emission and reflection radiometer (ASTER) – a new satellite-imaging system. *Economic Geology*, 2003, vol. 98, pp. 1018–1027.
9. Rowan L.C., Mars J.C. Lithologic mapping in the Mountain Pass, California area using Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) data. *Remote Sensing of Environment*, 2003, vol. 84, pp. 350–366.
10. Mars J.C., Rowan L.C. Regional mapping of phyllic- and argillic-altered rocks in the Zagros magmatic arc, Iran, using Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) data and logical operator algorithms. *Geosphere*, 2006, vol. 2, pp. 161–186.
11. Berger B.R., King T.V.V., Morath L.C., Phillips J.D. Utility of high-altitude infrared spectral data in mineral exploration – application to northern Patagonia Mountains, Arizona. *Economic Geology*, 2003, vol. 98, pp. 1003–1018.
12. Kruse F.A. Use of Airborne Imaging Spectrometer data to map minerals associated with hydrothermally altered rocks in the northern Grapevine Mountains, Nevada and California. *Remote Sensing of Environment*, 1988, vol. 24, no. 1, pp. 31–51.
13. Pour A.B., Hashim M. The application of ASTER remote sensing data to porphyry copper and epithermal gold deposits. *Ore Geology Reviews*, 2012, vol. 44, pp. 1–9.
14. Di Tommaso I., Rubinstein N. Hydrothermal alteration mapping using ASTER data in the infiernillo porphyry deposit, Argentina. *Ore Geology Reviews*, 2007, vol. 32 (1–2), pp. 275–290. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2006.05.004
15. Crosta A.P., McMoore J. Enhancement of Landsat Thematic Mapper imagery for residual soil mapping in SW Minas Gerais State, Brazil: a prospecting case history in greenstone belt terrain. *Seventh Thematic Conference on Remote Sensing for Exploration Geology*. Calgary, Alberta, Canada, Erim, 1989. pp. 1173–1187.
16. Esmaeilzadeh N., Barak S., Gani N. D., Imamalipour A., Abedi M., Pour A.B. Alteration zones detection using image-based and spectrum-based image processing techniques to Aster data: Sonajil Copper Deposit. *IGARSS 2023 – 2023 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. Pasadena, CA, USA, 2023. pp. 3700–3703. DOI: 10.1109/IGARSS52108.2023.10281515.
17. Zidan U., El Desouky H.A., Gaber M.M., Abdelsamea M.M. From pixels to deposits: porphyry mineralization with multispectral convolutional neural networks. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2023, vol. 16, pp. 9259–9271. DOI: 10.1109/JSTARS.2023.3321714.
18. Mazurov A.K. *Geodynamic settings of formation of metallogenic complexes of Kazakhstan*. Dr. Diss. Kokshetau, 2003. 329 p. (In Russ.)
19. Seitmuratova E.Yu., Arshamov Ya.K., Baratov R.T., Bakdauletzyzy S., Dautbekov D.O., Satemirova Zh.I. Current state of knowledge of geodynamics and metallogeny of the Zhongaro-Balkhash folded system. *Mining Journal of Kazakhstan*, 2015, no. 3, pp. 12–16. (In Russ.) Available at: <https://rucont.ru/efd/456880> (дата обращения 30.03.2025).
20. *Geological map: L-(43), (44) (Taldy-Kurgan)*. *Geological map of the USSR*. Geological map, scale: 1:1000000. Ed. by N.A. Afonichev. St. Petersburg, VSEGEI Publ., 1974. (In Russ.)
21. Bakhteyev M.K. *Paleozoic orogenic volcano-plutonic belts*. Moscow, Nedra Publ., 1987. 168 p. (In Russ.)
22. Bespayev H.A., Parilov Yu.S. Bespayev H.A., Parilov Yu.S. *Conditions of formation of copper, lead, zinc and iron deposits in Kazakhstan: (based on the results of studying fluid inclusions)*. Almaty, Gylym Publ., 1998. 352 p. (In Russ.)
23. Antonenko A.A., Zhukov N.M., Gerzen L.Ye., Goikolova T.V. Features of mineral and element composition of poor ores of deposits Aktogay and Bozshakol. *News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan series of geology and technical sciences*, 2016, no. 4, pp. 18–27. (In Russ.)
24. EarthExplorer. *USGS science for a changing world*. Available at: <https://earthexplorer.usgs.gov/> (accessed 10 April 2024).
25. Pour A.B., Park Y., Park Tae-Yoon S., Hong J.K., Hashim M., Woo J., Ayoobi I. Evaluation of ICA and CEM algorithms with Landsat-8/ASTER data for geological mapping in inaccessible regions. *Geocarto International*, 2018, vol. 34, pp. 1–64. DOI: 10.1080/10106049.2018.1434684.
26. Kokaly R.F., Clark R.N., Swayze G.A., Livo K.E., Hoefen T.M., Pearson N.C., Wise R.A., Benzel W.M., Lowers H.A., Driscoll R.L., Klein A.J. *USGS Spectral library version7: U.S. Geological Survey Data Series*, 2017, 1035, 61 p.
27. Abrams M., Hook S., Ramachandran B. ASTER User Handbook, v2: Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer. *Advances in Space Research*. Pasadena, Jet Propulsion Laboratory, 2002. DOI: 10.1016/j.asr.2019.01.035.
28. Hewson R.D., Cudahy T.J., Mizuhiko S., Ueda K., Mauger A.J. Seamless geological map generation using ASTER in the Broken Hill Curnamona province of Australia. *Remote Sensing of Environment*, 2005, vol. 99 (1–2), pp. 159–172.

29. Ninomiya Y., Fu B., Cudahy T.J. Detecting lithology with Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) multispectral thermal infrared «radiance-at-sensor» data. *Remote Sensing of Environment*, 2005, vol. 99, pp. 127–139.
30. Ninomiya Y. A Stabilized Vegetation Index and Several Mineralogic Indices Defined for ASTER VNIR and SWIR Data. *Proceedings of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. Toulouse, France, 21–25 July 2003. Vol. 3, pp. 1552–1554.
31. Ready P.J., Wintz P.A. Information extraction, SNR improvement, and data compression in multispectral imagery, *IEEE Trans. Commun.*, 1973, vol. 21, pp. 1123–1130.

Information about the authors

Fedor E. Seirov, Postgraduate Student, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation; fes2@tpu.ru

Yury S. Ananyev, Dr. Sc., Associate Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation; ananyevys@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0074-5980>

Received: 04.04.2025

Revised: 05.05.2025

Accepted: 16.06.2025

УДК 504.3.054
DOI: 10.18799/24131830/2025/7/5182
Шифр специальности ВАК: 1.6.21
Научная статья

Оценка эколого-геохимического состояния территории г. Кемерово на основе изучения снегового покрова (Кемеровская область)

В.Д. Новикова[✉], А.В. Таловская, Е.Г. Язиков

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск

[✉]vdk10@tpu.ru

Аннотация. *Актуальность* работы определяется необходимостью эколого-геохимической оценки состояния промышленно-урбанизированных территорий с эффектом «городского острова тепла» в регионах с устойчивым залеганием снегового покрова, где происходит накопление техногенных эмиссий в воздухе за счет частых атмосферных инверсий и слабого ветрового режима в зимний сезон, наличия городской застройки. *Цель:* оценка эколого-геохимического состояния территории г. Кемерово, крупного промышленного центра химической и теплоэнергетической отрасли, на основе изучения снегового покрова как естественного аккумулятора атмосферных выпадений. *Объекты:* нерастворимая фракция снежного покрова. *Методы:* площадная снегогеохимическая съемка, инструментальный нейтронно-активационный анализ, атомно-абсорбционная спектрометрия, сканирующая электронная микроскопия, статистические и эколого-геохимические методы. *Результаты и выводы.* Пылевая нагрузка на территорию города изменяется от 15 до 609 при среднем 207 мг/(м²·сут.). Ореол с высоким уровнем пылевой нагрузки (240–600 мг/(м²·сут.)) формируется в северной части города с частной и высокоэтажной застройкой, теплоэнергетическими и химическими предприятиями; со средним (60–240 мг/(м²·сут.)) – на большей части города; с низким (20–60 мг/(м²·сут.)) – в западной и южной частях, где расположены частный сектор и малоэтажные здания, производство удобрений. Техногенная геохимическая специфика нерастворимой фракции снежного покрова выражена в повышенных уровнях накопления относительно фона U, Yb, Tb, La, Sm, Ba (10–22 фона), Ce, Sr, Ca, Ta, Na, Th, Lu, Hf, Nd, Sc (2–10 фона), в полиэлементной ассоциации (Sc-Co-Ba-La-Ce-Yb-Lu-Hf-Th-U), формирующей средний уровень загрязнения. Обнаружены микрочастицы фосфатов цериевых, сульфатов бария, сульфидов свинца с примесями цинка и железа, характеризующие формы нахождения металлов в снеговом покрове. Выделены три атмогеохимических ореола: первый ореол с полиэлементной ассоциацией (Sc-Fe-Co-Rb-Sr-Cs-Ba-La-Ce-Nd-Eu-Tb-Yb-Lu-Hf-Th-U) занимает основную часть города, связан с переносом выбросов от предприятий и автотранспорта; второй ореол (Cr-Zn-Br-Sb) расположен в рекреационных зонах, сформирован преимущественно влиянием автотранспорта; третий ореол (Ca-Cs-Ta-Th-Hg) приурочен к зоне воздействия предприятий теплоэнергетики и коксохимии, где используются угли Кузнецкого бассейна. Геохимические ассоциации в нерастворимой фракции снежного покрова могут быть использованы в качестве индикаторов геохимического фона «городского острова тепла», формируемого выбросами теплоэнергетической и химической промышленности, автотранспортом.

Ключевые слова: снеговой покров, тяжелые металлы, радиоактивные и редкоземельные элементы, теплоэлектростанция, коксохимическое производство, пылевая нагрузка, городской остров тепла

Благодарности. Авторы выражают благодарность аналитикам Александру Федоровичу Судыко и Ларисе Васильевне Богутской за выполнение аналитических работ методом инструментального нейтронно-активационного анализа, кандидату химических наук, доценту отделения геологии Томского политехнического университета Нине Александровне Осиповой за консультирование в процессе определения концентрации ртути в пробах, Екатерине Анатольевне Филимоновой и Дарье Анатольевне Володиной за содействие в 2016 г. в отборе и подготовке проб снегового покрова, кандидату геолого-минералогических наук, доценту отделения геологии Томского политехнического университета Ильенку Сергею Сергеевичу за консультирование в процессе определения частиц на электронном сканирующем микроскопе.

Исследования выполнены в НИ ТПУ в рамках программы повышения конкурентоспособности ТПУ среди ведущих мировых исследовательских центров.

Работа выполнена с использованием оборудования центра коллективного пользования УНУ ИРТ-Т и МИНОЦ «Урановая геология» ТПУ.

Для цитирования: Новикова В.Д., Таловская А.В., Язиков Е.Г. Оценка эколого-геохимического состояния территории города Кемерово на основе изучения снегового покрова (Кемеровская область) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 7. – С. 210–223. DOI: 10.18799/24131830/2025/7/5182

UDC 504.3.054
DOI: 10.18799/24131830/2025/7/5182
Scientific paper

Eco-geochemical assessment of Kemerovo city using snow cover (Kemerovo region)

V.D. Novikova[✉], A.V. Talovskaya, E.G. Yazikov

National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

[✉]vdk10@tpu.ru

Abstract. Relevance. Assessing pollution in urbanized areas under "heat island" conditions and snow cover, which accumulates emissions due to atmospheric inversions, low wind speeds, and dense urban development. **Aim.** To evaluate the eco-geochemical status of Kemerovo – a major chemical and thermal power plant – by analysing insoluble particulate matter in snow cover. **Objects.** Insoluble fraction of snow cover. **Methods.** Snow geochemical survey, instrumental neutron activation analysis, atomic absorption spectrometry, scanning electron microscopy, statistical/ecological-geochemical methods. **Results and conclusions.** Particulate load ranged 15–609 mg/(m²·day) (mean: 207). Hazardous pollution level (240–600 mg/(m²·day)) occurred in northern districts with residential zones, thermal power plant and chemical enterprises. Moderately hazardous (60–240 mg/(m²·day)) dominated in central areas. Allowable (20–60 mg/(m²·day)) is typical for western/southern sectors (low-rise housing, fertilizer production). Elevated concentrations of U, Yb, La, Ba, Ce, Sr, and others (2–22 background) formed distinct association (Sc-Co-Ba-La-Ce-Yb-Lu-Hf-Th-U) indicating moderate pollution. Microparticles of cerium phosphates, barium sulfates, lead sulfides with Zn/Fe admixtures were found, characterizing the modes of metal occurrence in the snow cover. Three atmogeochemical aureole were identified: 1. aureole with an association (Sc-Fe-Co-Rb-Sr-Cs-Ba-La-Ce-Nd-Eu-Tb-Yb-Lu-Hf-Th-U) cover the main part of the city and associated with emissions from plants and vehicles; 2. aureole (Cr-Zn-Br-Sb) located in residential and recreational areas, formed mainly by the influence of transport; 3. aureole (Ca-Cs-Ta-Th-Hg) confined to the zone of influence of thermal power plant and coke industry enterprises, where coal from the Kuznetsk basin is used. Geochemical associations in the insoluble fraction of snow cover can be used as an indicator of the geochemical background of the "urban heat island" formed by emissions from the thermal power plant and vehicles.

Keywords: snow cover, heavy metals, radioactive and rare earth elements, thermal power plant, coke industry enterprises, particulate load, urban heat island

Acknowledgements. The authors express their gratitude to analysts Alexander F. Sudyko and Larisa V. Bogutskaya for performing analytical work using instrumental neutron activation analysis, to Nina A. Osipova, Cnad. Sc., Associate Professor at the Geology Division of Tomsk Polytechnic University, for her consultation during mercury concentration determination in the samples, and to Ekaterina A. Filimonenko and Darya A. Volodina for their assistance in snow cover sampling and preparation in 2016. Special thanks to Sergey S. Ilienok, Cand. Sc., Associate Professor at the Geology Division of Tomsk Polytechnic University, for his guidance in particle analysis using scanning electron microscopy.

This research was conducted at the National Research Tomsk Polytechnic University as part of our program to enhance the competitiveness of Tomsk Polytechnic University among the world's leading research institutions.

The work was carried out using the equipment provided by the center for shared use of the Educational and Scientific Center "Nuclear Research Reactor" and the International Innovative Science and Education Center "Uranium Geology", named after L.P. Rikhvanov, at Tomsk Polytechnic University.

For citation: Novikova V.D., Talovskaya A.V., Yazikov E.G. Assessment of the ecological and geochemical condition of the Kemerovo city territory based on the study of snow cover (Kemerovo region). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 7, pp. 210–223. DOI: 10.18799/24131830/2025/7/5182

Введение

В условиях современной урбанизации и интенсивного развития промышленности наблюдается формирование так называемого «городского острова тепла» – явления, при котором температура в городской промышленной зоне значительно превышает температуру окружающих территорий. Это связано с высокой концентрацией антропогенных источников тепла, таких как теплоэлектростанции,

транспорт, промышленные предприятия, а также с изменением природного ландшафта.

«Городской остров тепла» оказывает значительное влияние на микроклимат и экологическую обстановку, особенно в регионах с устойчивым залеганием снегового покрова, где зимние метеорологические процессы характеризуются высокой частотой атмосферных инверсий и слабым ветровым режимом [1–3]. В таких условиях формируются

устойчивые пограничные слои атмосферы с мощным слоем перемешивания, ограниченным высотой городской застройки. Это способствует накоплению техногенных эмиссий тепла и загрязняющих веществ в приземном слое воздуха. В сочетании с теплоотдачей жилых и промышленных зданий это приводит к формированию местного «парникового эффекта» и «аэрозольной шапки» над городом. Аэрозольная шапка над городами Сибири, возникающая вследствие суперпозиции выбросов в приземном слое и вышерасположенных источников, имеет вертикальные размеры в несколько сотен метров (400–600 м) и несколько десятков километров по горизонтали [4].

Аэрозольная шапка, состоящая преимущественно из аэрозолей твердых частиц, играет ключевую роль в накоплении загрязняющих веществ в приземном слое воздуха. Твердые частицы содержат микроэлементы, которые оказывают влияние на эколого-геохимическую обстановку и здоровье населения, вызывая респираторные и сердечно-сосудистые заболевания [5, 6]. Кроме того, они участвуют в процессах формирования осадков, включая снеговой покров.

Снеговой покров используется многими исследователями как индикатор состава атмосферных выпадений, поскольку аккумулирует твердые частицы с комплексом химических элементов природного и антропогенного происхождения [7–10]. Следовательно, снеговой покров становится ценным объектом для эколого-геохимических исследований в условиях «городского острова тепла». В работе [11] показано, что соотношения концентраций химических элементов в жидкой фазе снега при послойном опробовании снегового покрова могут быть геохимическими маркерами застойных зон в «городском острове тепла». Однако концентрация химических элементов в нерастворимой фракции снежного покрова и их пространственное распределение в условиях «городского острова тепла» изучены недостаточно.

Особенно актуально изучение в зимний сезон геохимических особенностей состава аэрозолей твердых частиц в «острове тепла» Сибирских городов с развитой промышленной инфраструктурой, например, таких как Кемерово, где сосредоточены крупные предприятия теплоэнергетики и химической промышленности страны [12, 13]. Статья посвящена оценке эколого-геохимического состояния территории г. Кемерово на основе анализа пространственного распределения пылевой нагрузки, концентраций и ассоциаций химических элементов, включая малоизученные в геохимическом плане редкие элементы, в нерастворимой фракции снежного покрова.

Материалы и методы

Снегогеохимическая съемка проводилась на территории г. Кемерово в соответствии с методом площадной съемки, масштабом 1:50000 со сгущением и разряжением сети в некоторых районах. Всего было отобрано 68 проб снега в течение четырех зимних сезонов (2016, 2020, 2022 и 2023 гг.). Методика отбора проб, основанная на опубликованных материалах [14, 15] и методических рекомендациях [16, 17], включала: 1) полное извлечение снежного шурфа с исключением 5-сантиметрового приконтактного слоя для исключения почвенной примеси; 2) использование пластикового инструмента для предотвращения вторичного загрязнения; 3) расположение точек отбора с учетом размещения промышленных предприятий и удаленности от транспортных магистралей (не менее 20 м); 4) доступности и репрезентативности участка для отбора проб.

Подготовка проб к анализу осуществлялась по следующим этапам: 1) таяние проб снегового покрова при комнатной температуре; 2) отделение нерастворимой фракции от жидкой фазы снега путем использования беззольного фильтра типа «синяя лента»; 3) просушивание фильтров с нерастворимой фракцией при комнатных условиях; 4) просеивание фракции (сито с ячейками 1 мм); 5) определение массы полученной фракции.

В лабораториях учебно-научного центра «Исследовательский ядерный реактор» центра коллективного пользования УНУ ИРТ-Т и международного инновационного научно-образовательного центра «Урановая геология» на базе отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета проводился анализ проб нерастворимой фракции снежного покрова. Элементный состав исследовали с применением инструментального нейтронно-активационного анализа (ИНАА), которым определены концентрации в пробах 26 приоритетных элементов (параметры облучения: поток тепловых нейтронов $2 \cdot 10^{13}$ нейтр/(см²·с)). Применялся метод атомно-абсорбционной спектрометрии с пиролизной приставкой (РА-915М с приставкой ПИРО-915+) для определения концентрации ртути (предел обнаружения – 5 нг/г).

С помощью электронного сканирующего микроскопа (S-3400N фирмы Hitachi) с энергодисперсионной приставкой для микроанализа (Bruker XFlash 4010) проведена идентификация металлосодержащих микрочастиц.

Для количественной оценки загрязнения снежного покрова использованы эколого-геохимические показатели:

1. Пылевая нагрузка P_n (мг/(м²·сут.)) по формуле (1):

$$P_n = \frac{P_0}{S \cdot t}, \quad (1)$$

где P_0 – масса нерастворимой фракции снежного покрова, мг; S – площадь снегового шурфа, м²; t – количество суток от начала снегостава до дня отбора проб.

Полученные значения P_n мг/(м²·сут.) оценивают уровни загрязнения территории по градации, относительно фона для Сибири [18]: менее 20 – около-фоновый; 20–60 – низкий; 60–240 – средний; 240–600 – высокий; более 600 – очень высокий.

2. Коэффициент концентрации (K_c) для каждого химического элемента рассчитывался по формуле (2):

$$K_c = \frac{C}{C_{\phi}}, \quad (2)$$

где C – содержание элемента в пробе, мг/кг; C_{ϕ} – фоновая концентрация элемента, мг/кг. Фоновые концентрации элементов в нерастворимой фракции снежного покрова приняты по опубликованным работам [18–20].

После расчета K_c составлялся геохимический ассоциативный ряд элементов с наибольшими коэффициентами концентрации в порядке убывания, что характеризует аномальность содержания химических элементов в пробах.

3. Суммарный показатель загрязнения (Z_c) снежного покрова изучаемыми химическими элементами рассчитывался по формуле (3):

$$Z_c = \sum K_c - (n - 1), \quad (3)$$

где n – число элементов, имеющих $K_c > 1,5$ с учетом флуктуации фона.

По полученным значениям Z_c определяют уровни загрязнения территории по общепринятой градации [14–17]: менее 64 – низкий; 64–128 – средний; 128–256 – высокий; более 256 – очень высокий.

Для комплексного анализа результатов исследования был применен многоуровневый статистический подход с использованием программного обеспечения Statistica. С помощью описательной статистики определены среднеарифметические значения, стандартные отклонения, коэффициенты вариации, медиана, мода, минимум и максимум, показатели асимметрии и эксцесса. Для выделения геохимических ассоциаций в пробах и факторов их формирования использовали корреляционный, кластерный, факторный анализ и метод К-средних. Корреляционная связь была обнаружена между элементами в пробах нерастворимой фракции снежного покрова с помощью коэффициента корреляции Пирсона и Спирмена. Схема расположения города и точек опробования была создана в

программе CorelDRAW. Схемы пространственного распределения пылевой нагрузки, зонирования территории по результатам анализа геохимических данных комплексом статистических методов были построены с помощью программы Surfer.

Результаты и обсуждения

Уровень пылевой нагрузки

Уровень пылевой нагрузки на территории г. Кемерово изменяется от 15 до 609 мг/(м²·сут.) (табл. 1). Распределение пылевой нагрузки на территории города характеризуется логнормальным законом распределения согласно расчетам теста Колмагорова–Смирнова и отношений асимметрии и эксцесса к их стандартным ошибкам (более 3 ед.).

Средний уровень пылевой нагрузки составил 207 мг/(м²·сут.), что соответствует среднему уровню загрязнения по градации относительно фона. Медианное значение (201 мг/(м²·сут.)) близко к среднему, что подтверждает симметричное распределение данных без значительных выбросов. Полимодальное распределение, которое имеет несколько часто встречающихся значений, что может быть связано с разнородностью источников загрязнения (промышленность, транспорт, городской ландшафт). Коэффициент вариации составляет 74 %, такое распределение характеризуется как сильно неоднородное, что соответствует урбанизированным территориям с разнообразными источниками загрязнения.

Таблица 1. Статистические параметры пылевой нагрузки на территории г. Кемерово по данным снеговой съемки

Table 1. Statistical parameters of particulate load on the territory of Kemerovo according to snow survey data

n	m	Xгеом	Xmed	Xmod	Min	Max	S
68	207	146	201	полимодальное распределение multimodal distribution	15	609	152
δm	V	A	δA	E	δE	A/δA	E/δE
19	74	0,6	0,3	–0,5	0,6	2	–0,8

Примечание: n – объем выборки (количество проб), m – среднее, $X_{геом}$ – среднее геометрическое; X_{med} – медиана, X_{mod} – мода, Min – минимум, Max – максимум, S – стандартное отклонение, δm – стандартная ошибка среднего, V – коэффициент вариации, A – асимметрия, δA – стандартная ошибка асимметрии, E – эксцесс, δE – стандартная ошибка эксцесса.

Note: n is the sample size (number of samples), m is the average, $X_{геом}$ is the geometric mean; X_{med} is the median, X_{mod} is the mode, Min is the minimum, Max is the maximum, S is the standard deviation, δm is the standard error of the average, V is the coefficient of variation, A is the asymmetry, δA is the standard error asymmetries, E is the kurtosis, and δE is the standard error of the kurtosis.

По всей площади города выделены три зоны с разным уровнем пылевой нагрузки (рис. 1). Первая зона имеет площадь 19 км² и отличается высоким уровнем пылевой нагрузки относительно фона (240–600 мг/(м²·сут.)). В данной зоне находятся частный сектор и разноуровневая застройка с преобладанием высокоэтажных жилых зданий. Пространственное расположение соответствует северной части города и начинается от 1,5 км и достигает 4 км с подветренной стороны от предприятий теплоэнергетики и коксохимии, где происходит основной массоперенос загрязняющих веществ.

Вторая зона площадью 66 км² характеризуется средним уровнем пылевой нагрузки (60–240 мг/(м²·сут.)). Зона охватывает большую часть города с жилыми, рекреационными зонами и транспортными развязками.

Третья зона площадью 12 км² с низким уровнем пылевой нагрузки относительно фона (20–60 мг/(м²·сут.)) находится преимущественно на периферии города, в частности в районе расположения завода по производству азотистых удобрений в западном районе города, частной и малоэтажной застройки – в южной части города.

Формирование зон с высоким и низким уровнем пылевой нагрузки в северной части и на периферии

города, соответственно, вероятно, отражает влияние эффекта «острова тепла». Вблизи предприятий температура воздуха будет выше, чем на удалении от него, из-за теплового воздействия самих предприятий, что приводит к образованию над ними «острова тепла», что способствует высокому накоплению загрязняющих веществ в окрестностях источников выбросов. Высокий уровень загрязняющих веществ в приземном слое воздуха в зимний период обусловлен не только интенсификацией антропогенных источников, но и воздействием характерных для этого периода приземных температурных инверсий, препятствующих эмиссии аэрозоля в вышележащие слои атмосферы [21, 22]. Дополнительно на городскую атмосферную циркуляцию оказывает влияние ориентация и высота зданий, плотность застройки, характер озеленения. В комплексе данные процессы приводят к формированию «шапки» загрязнений. Следовательно, вышеописанные механизмы городской локальной циркуляции в зимний период способствуют увеличению концентрации аэрозольных примесей в атмосферном воздухе, которые затем осаждаются на дневную поверхность и приводят к увеличению массы пыли в снеговом покрове.



Рис. 1. Схема распределения пылевой нагрузки на территорию г. Кемерово («роза» ветров приведена на зимний период, градация по уровню пылевой нагрузки относительно фона [18]). Крупные предприятия: 1 – ГРЭС, 2 – коксохимический завод, 3 – механический завод, 4 – производство гипохлорита кальция, 5 – ТЭЦ, 6 – завод азотистых удобрений, 7 – ТЭЦ

Fig. 1. Scheme of particulate load distribution in Kemerovo (the «rose» of winds is shown for the winter period, gradation according to the level of particulate load relative to background [18]). Large enterprises: 1 – thermal power plant; 2 – coke industry enterprises; 3 – mechanical engineering plant; 4 – calcium hypochlorite production facility; 5 – thermal power plant; 6 – nitrogen fertilizer plant; 7 – thermal power plant

Уровень пылевой нагрузки в г. Кемерово имеет превышение от 1,5 до 7 раз в отличие от некоторых городов Кемеровской области (рис. 2).

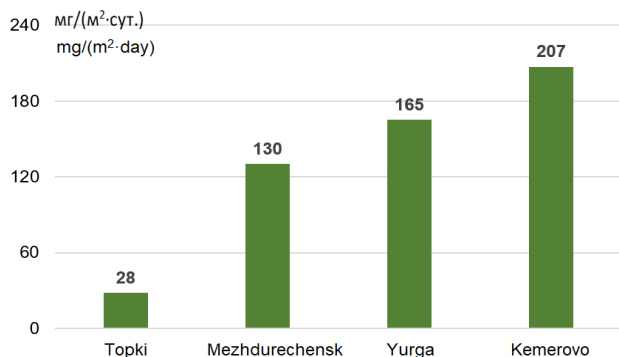


Рис. 2. Средние значения пылевой нагрузки в отдельных городах Кемеровской области (Топки [23]; Междуреченск [24]; Юрга [20]; Кемерово – данные авторов)

Fig. 2. Average particulate load values in the cities of the Kemerovo region (Topki [23]; Mezhdurechensk [24]; Yurga [20]; Kemerovo – authors' data)

Химический состав нерастворимой фазы снежного покрова

По результатам исследований в нерастворимой фракции снежного покрова на территории г. Кемерово установлены уровни накопления макроэлементов (Ca, Na, Fe), тяжелых металлов и металлоидов (Ba, Co, Cr, Zn, As, Hg, Sb, Sr), лантаноидов (La, Ce, Nd, Sm, Eu, Tb, Yb, Lu), U, Th, Rb, Cs, Ta, Hf, Sc.

Нормальный закон распределения содержания элементов в нерастворимой фракции снежного покрова установлен для Na, Sc, Fe, Co, As, Rb, Sr, Cs, La, Ce, Sm, Yb, Lu, Hf, Ta, Hg, Th, U, отличный от нормального – для Ca, Cr, Zn, Br, Sb, Ba, Nd, Eu, Tb по результатам теста Колмогорова–Смирнова, Лиллиефорса и расчетов величины отношений асимметрии и эксцесса к их стандартным ошибкам. Коэффициент вариации (V) для большинства элементов имеет значение менее 50 %, что соответствует преимущественно однородному распределению, а неоднородность распределения в выборке характерна для Ca, As, Sb (V=от 50 до 70 %).

По коэффициентам концентраций элементов выявлена степень интенсивности их накопления в пробах нерастворимой фракции снежного покрова (табл. 2). Наиболее интенсивно ($K_c > 10$) концентрируются в пробах такие элементы, как U, Yb, Tb, La, Sm, Ba. Менее интенсивно ($K_c = 2-10$) в нерастворимой фракции снежного покрова накапливаются Ce, Sr, Ca, Ta, Na, Th, Lu, Hf, Nd, Sc. Близко к фоновым концентрациям ($K_c < 1,5$) выделяются элементы Eu, Cr, As, Br.

Общий вклад химических элементов в загрязнение снежного покрова отражается с помощью сум-

марного показателя загрязнения согласно общепринятой градации [16, 25], для исследуемой территории г. Кемерово уровень загрязнения соответствует среднему значению (табл. 2).

Таблица 2. Геохимические ряды ассоциаций химических элементов в нерастворимой фракции снежного покрова и суммарный показатель загрязнения (Zc) снежного покрова в г. Кемерово

Table 2. Geochemical series of chemical element associations in the insoluble fraction of snow cover and the total pollution index (Zc) in snow cover within Kemerovo

Геохимический ряд/Geochemical series	Zc
U₂₂–Yb₁₇–Tb₁₆–La₁₅–Sm₁₁–Ba₁₀–Ce₈–Sr₆–Ca₅–Ta₄–Na₄–Th₄–Lu₃–Hf₃–Nd₂–Sc₂–Hg₂–Co₂–Fe₂–Zn₂–Cs₂–Sb₂–Rb₂–Eu₁–Cr₁–As₁–Br₁	124

Примечание: субскрипты – значения K_c ; выделены полужирным шрифтом элементы с наиболее интенсивным накоплением, курсивом – с менее интенсивным накоплением, обычным шрифтом – элементы близкие к фоновым концентрациям.

Note: the subscripts are K_c values; the elements with the most intense accumulation are highlighted in bold, the elements with the least intense accumulation are in italics, the elements close to the background concentrations are in regular font.

Определены корреляционные связи между химическими элементами в нерастворимой фракции снежного покрова (табл. 3). Выявлены наиболее значимые коэффициенты корреляции на уровне $p < 0,01$. Высокая и очень высокая корреляционная связь (r от 0,63 до 0,92) установлена между элементами Sc, Co, Rb, Cs, Ba, La, Ce, Eu, Yb, Lu, Hf, Th, U, что может указывать на общий источник их поступления и схожие геохимические свойства.

В результате проведения кластерного анализа установлены ассоциации между химическими элементами по наивысшим мерам сходства парных коэффициентов корреляции Пирсона r . Дендрограммы корреляционных матриц содержаний химических элементов в пробах г. Кемерово представлены на рис. 3.

На дендрограмме первой представлена парная корреляция [Ba–Sr], между элементами выражена сильная связь. Второй представлена ассоциация химических элементов [Ta–Th–Cs–Rb] с умеренно сильной связью, третья парная корреляция состоит из [Nd–Ce]. Последняя обширная ассоциация [U–Eu–Co–Hf–La–Yb–Lu–Sc] с корреляционной связью от 0,67 до 0,92, после которой представлены парные корреляции [Sb–Zn], [Br–Cr], [Hg–As], [Fe–Na].

С помощью факторного анализа и К-средних определяли принадлежность элементов к факторам и точкам отбора проб по всей территории г. Кемерово. Табл. 4 демонстрирует сложную структуру загрязнения снежного покрова в г. Кемерово, где промышленные предприятия играют ключевую роль в формировании атмогеохимических ореолов.

Таблица 3. Матрица коэффициентов парной корреляции (r от 0,63 до 0,92) содержания химических элементов в нерастворимой фракции снежного покрова г. Кемерово

Table 3. Matrix of coefficients of paired correlation (r from 0.63 to 0.92) of the content of chemical elements in the insoluble fraction of snow cover in Kemerovo

	Sc	Co	Rb	Cs	Ba	La	Ce	Eu	Yb	Lu	Hf	Th	U
Co	0,62	1,00											
Rb	0,64	0,31	1,00										
Cs	0,54	0,34	0,80	1,00									
Ba	0,51	0,65	0,57	0,73	1,00								
La	0,75	0,70	0,68	0,78	0,82	1,00							
Ce	0,75	0,47	0,46	0,37	0,43	0,63	1,00						
Eu	0,67	0,67	0,48	0,48	0,55	0,72	0,58	1,00					
Yb	0,82	0,51	0,62	0,61	0,62	0,80	0,62	0,59	1,00				
Lu	0,89	0,61	0,65	0,67	0,65	0,84	0,68	0,71	0,87	1,00			
Hf	0,74	0,69	0,69	0,77	0,82	0,92	0,65	0,77	0,79	0,84	1,00		
Th	0,63	0,48	0,76	0,87	0,83	0,86	0,50	0,63	0,74	0,75	0,87	1,00	
U	0,45	0,59	0,46	0,61	0,72	0,75	0,41	0,63	0,53	0,57	0,76	0,71	1,00

Примечание: $n=63$; критическое значение коэффициента корреляции 0,25 при доверительной вероятности 0,01; полужирный шрифт – значимые корреляционные связи.

Note: $n=63$; the critical value of the correlation coefficient is 0.25 with a confidence probability of 0.01; bold – significant correlations.

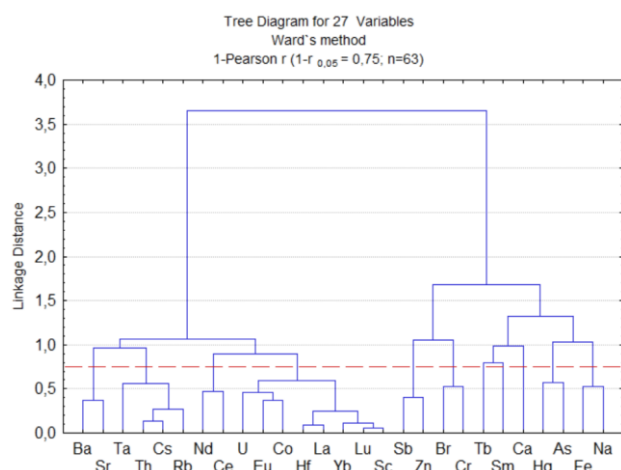


Рис. 3. Дендрограмма корреляционной матрицы геохимического спектра элементов в пробах нерастворимой фракции снежного покрова г. Кемерово

Fig. 3. Dendrogram of the correlation matrix of the geochemical spectrum of elements in samples of the insoluble fraction of snow cover in Kemerovo

«Фактор 1» обеспечивает 40 % дисперсии распределения элементов Sc, Fe, Co, Rb, Sr, Cs, Ba, La, Ce, Nd, Eu, Tb, Yb, Lu, Hf, Th, U. Данный фактор объединяет первый и второй кластеры, включающие в себя большую часть точек отбора проб на территории города. Фактор ярко выражен в жилых районах города с разноуровневой застройкой, включая территории частного сектора и наветренной стороны от промышленных предприятий теплоэнергетики и химической промышленности. Данный фактор, вероятно, отражает общий геохимический фон города, обусловленный рассеиванием выбросов предприятий по всей территории города.

«Фактор 2» имеет 11 % дисперсии содержаний химических элементов, наибольшее влияние данного фактора распространяется на элементы Cr, Zn, Br, Sb. Связан с локальными источниками загрязнения, такими как автотранспорт. Фактор преимущественно проявляется в четвертом кластере отбора проб, которые имеют местонахождение в рекреационной и селитебной частях города.

На «Фактор 3» приходится только 8 % дисперсии, что включает элементы Ca, Cs, Ta, Th, Hg. Данный фактор включает точки отбора проб третьего кластера, находящиеся под влиянием выбросов предприятий теплоэнергетики, химической промышленности, в том числе и коксохимии.

Обработка геохимических данных с помощью факторного, корреляционного и кластерного анализа, метода К-средних в сочетании с графическим представлением данных в виде карт-схем позволила выделить три геохимические зоны на территории г. Кемерово, которые характеризуются различными уровнями накопления и ассоциациями ряда элементов в нерастворимой фракции снежного покрова (рис. 4).

Выявленные особенности пространственного распределения геохимических ассоциаций в нерастворимой фракции снежного покрова отражают наличие застойных зон в «городском острове тепла», формирующихся под влиянием теплоэнергетической и химической отрасли, автотранспорта и частного сектора.

Сильные корреляционные связи в геохимической ассоциации Sc-Fe-Co-Rb-Sr-Cs-Ba-La-Ce-Nd-Eu-Tb-Yb-Lu-Hf-Th-U могут обосновываться влиянием теплоэнергетики, что подтверждается нашими многолетними исследованиями снежного покрова в зоне влияния угольных ТЭЦ и коксохимического завода [26].

Таблица 4. Результаты факторного анализа и анализа и метода К-средних в пробах нерастворимой фракции снежного покрова г. Кемерово

Table 4. Results of factor analysis and K-means analysis in samples of insoluble fraction of snow cover in Kemerovo

Кластер точек/Sample cluster	Ф1	Ф2	Ф3
d	40	11	8
Элементы/Elements	Sc, Fe, Co, Rb, Sr, Cs, Ba, La, Ce, Nd, Eu, Tb, Yb, Lu, Hf, Th, U	Cr, Zn, Br, Sb	Ca, Cs, Ta, Th, Hg
15, 26, 27, 30, 34–37, 42, 46, 57, 65, 68	Аутсайдер Outsider	Выше среднего Above average	Ниже среднего Below average
25, 38–41, 43–45, 47, 48, 50, 52–56, 58–64, 66	Выше среднего Above average	Ниже среднего Below average	Ниже среднего Below average
1–14, 18, 51		Ниже среднего Below average	Выше среднего Above average
16, 17, 19–24, 28, 29, 31–33, 49, 67		Лидер Leader	Ниже среднего Below average

Примечание: Ф – фактор, d – дисперсия, номера точек отражены на рис. 4.

Note: Ф – factor, d – variance, point numbers are shown in Fig. 4.

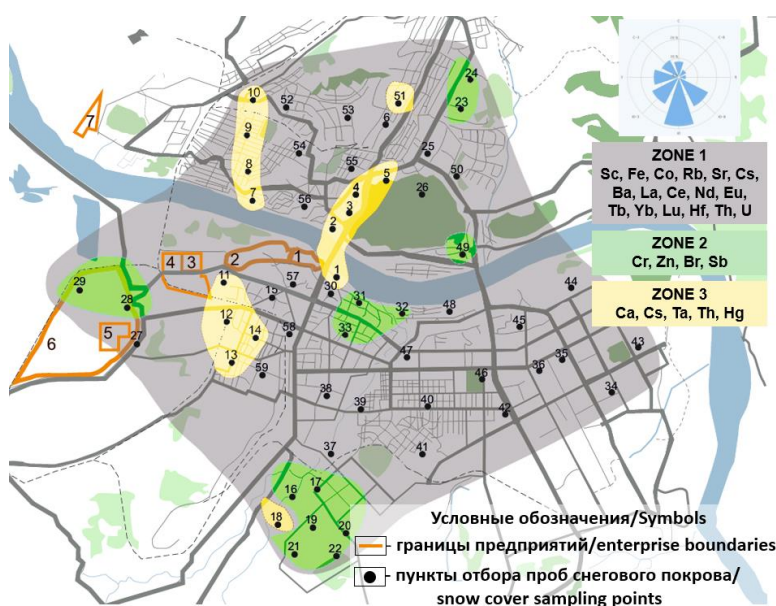


Рис. 4. Схема зонирования территории г. Кемерово по геохимическим ассоциациям в нерастворимой фракции снежного покрова. Крупные предприятия: 1 – ГРЭС, 2 – коксохимический завод, 3 – механический завод, 4 – производство гипохлорита кальция, 5 – ТЭЦ, 6 – завод азотистых удобрений, 7 – ТЭЦ

Fig. 4. Scheme of zoning of the territory of Kemerovo by geochemical associations in the insoluble fraction of snow cover. Large enterprises: 1 – thermal power plant; 2 – coke industry enterprises; 3 – mechanical engineering plant; 4 – calcium hypochlorite production facility; 5 – thermal power plant; 6 – nitrogen fertilizer plant; 7 – thermal power plant

В пробах нерастворимой фракции снежного покрова обнаружены частицы, представленные фосфатами цериевыми (рис. 5, а) и сульфатами бария (рис. 5, б). Алюмосиликатные микросферулы (рис. 5, в) и ферросферулы (рис. 5, в, г) обнаружены в пробах из различных частей города, что свидетельствует о переносе выбросов от источников сжигания топлива. Зола уноса теплоэлектростанций по составу представлена преимущественно алюмосиликатными и железистыми сферическими образованиями [27]. В пробах, находящихся под воздействием автотранспорта, обнаружены сульфиды свинца с примесью цинка и железа (рис. 5, д).

По данным С.И. Арбузова состав углей Кузнецкого бассейна характеризуется редкоземельной и

радиоактивной специализацией [28]. В углях содержатся микрофазы бария и железа, фосфаты редких металлов [29]. Кроме того, ранее нами установлена средняя и высокая степень корреляционной связи между содержанием Ca, Sc, Sr, Cs, Ba, La, Ce, Nd, Sm, Tb, Yb, Lu, Hf, Ta, Hg, Th, U в нерастворимой фракции снежного покрова и их концентрациями в золе уноса, а также между нерастворимой фракцией снега и углем [26]. Таким образом, выявленная геохимическая специфика нерастворимой фракции снежного покрова отражает влияние сжигания и использования углей на теплоэлектростанциях города и предприятиях коксохимии.

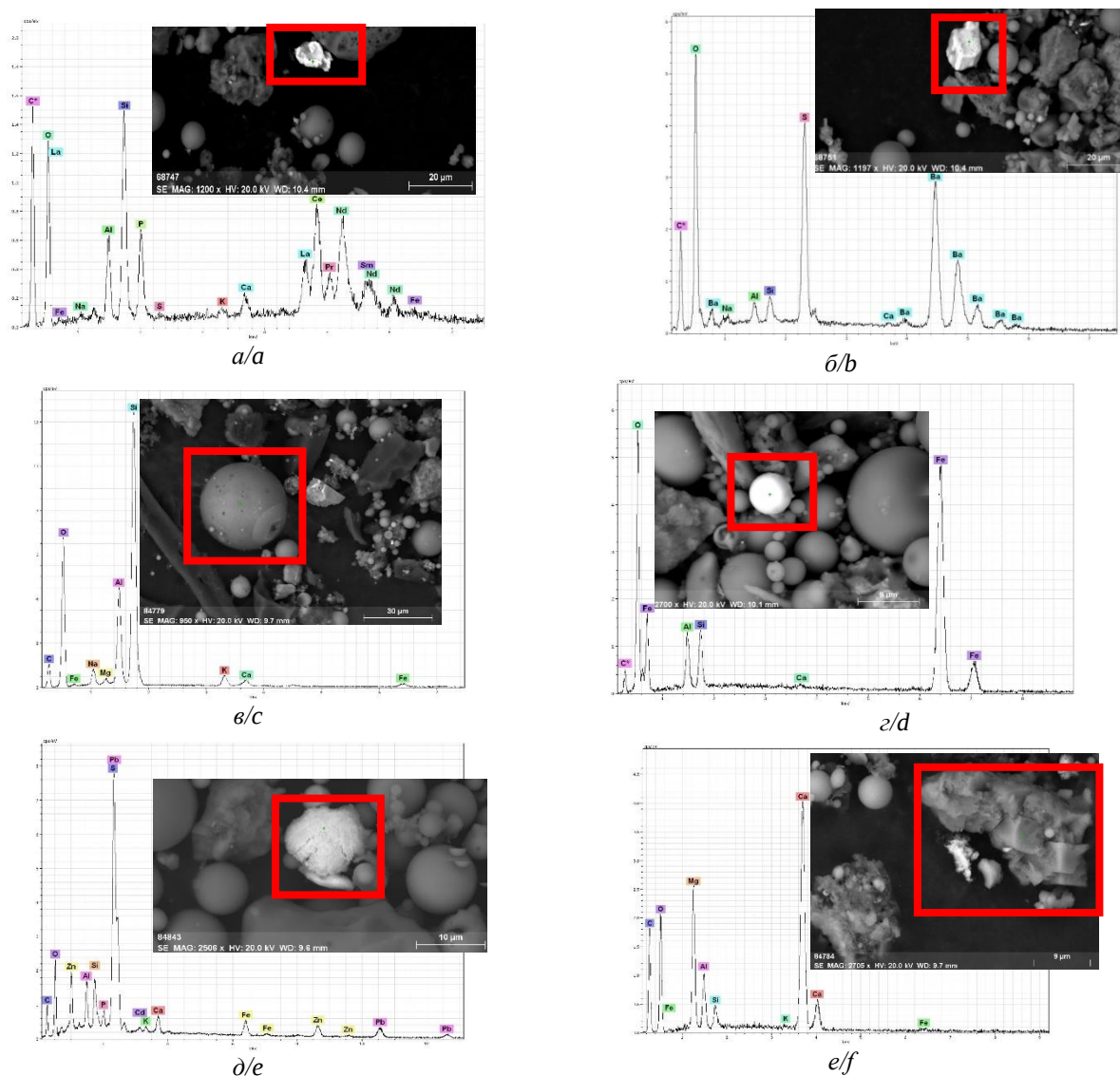


Рис. 5. Микрофотографии и энергодисперсионные спектры частиц в нерастворимой фракции снежного покрова по данным сканирующей электронной микроскопии: а) фосфаты цериевые; б) сульфаты бария; в) алюмосиликатная микросферула; г) ферросферулы; д) сульфиды свинца с примесью цинка и железа; е) Ca-содержащая фаза

Fig. 5. Micrographs and energy dispersion spectra of particles in the insoluble fraction of snow cover according to scanning electron microscopy: a) cerium phosphates; b) barium sulfates; c) aluminosilicate microspherule; d) ferrospherules; e) lead sulfides with admixture of zinc and iron; f) Ca-containing phase

В пробах ассоциация As-Hg, соединения которых при высоких температурах становятся летучими, может указывать на поступление от процессов сжигания угля и коксохимического производства. При производстве кокса в г. Кемерово эмиссия ртути в атмосферу составляла 0,073 т в год [30].

Интенсивное накопление Ca и Na и ассоциация Na-Fe в пробах нерастворимой фракции снежного покрова, вероятно, связаны с составом противогололедных реагентов. В нерастворимой фракции снежного покрова обнаружены алюмосиликатные и кальциевые микрофазы (рис. 5, е). В городах общепринято использовать в виде противогололедных

реагентов техническую соль (твердый хлорид натрия, хлорид кальция), песок и мелкий щебень с добавлениями ингибиторов коррозии [31, 32]. Дополнительным источником поступления кальция может являться предприятие по производству гипохлорита кальция (с высоким содержанием активного вещества не менее 65 %) [33]. Источником Zn, Sb, Cr могут выступать выхлопные газы автотранспорта, истирание шин, износ тормозных колодок [34–36]. Источником поступления брома могут считаться выхлопные выбросы автотранспорта [37, 38]. В дорожной пыли дворов доля многих тяжелых металлов и металлоидов (Ni, Cr, Cd, Bi, As,

Zn) возрастает [39–41]. Данное явление обусловлено спецификой транспортной нагрузки в дворовых территориях: низкая скорость движения, частые торможения и старты способствуют активному износу автокомпонентов (тормозных колодок, шин, сцепления). Как следствие, от автотранспорта в окружающую среду поступают мелкодисперсные частицы, обогащенные токсичными элементами.

Заключение

Проведенное исследование снежного покрова на территории г. Кемерово, где функционируют крупные предприятия химической, коксохимической и теплоэнергетической отрасли, использующие угли Кузнецкого бассейна, позволило получить оценку эколого-геохимического состояния территории и выявить основные источники загрязнения. Результаты исследования также показали, что выявленные особенности распределения пылевой нагрузки на территорию города и геохимические характеристики нерастворимой фракции снежного покрова отражают эффект «городского острова тепла», формируемого промышленными выбросами и автотранспортом.

В итоге можно сделать следующие выводы:

1. В г. Кемерово пылевая нагрузка изменяется от 15 до 609 при среднем 207 мг/(м²·сут.). Территория города разделена на три зоны, различающиеся по интенсивности пылевой нагрузки. Первая зона, характеризующаяся высоким уровнем пылевой нагрузки (240–600 мг/(м²·сут.)) относительно фона, расположена в северной части города с частной и многоэтажной застройкой, которая подвержена влиянию выбросов от предприятий теплоэнергетики и химического производства. Вторая зона, где зафиксирован средний уровень пылевой нагрузки (60–240 мг/(м²·сут.)), занимает основную часть городской территории, включая жилые, рекреационные районы и транспортные узлы. Третья зона с низким уровнем пылевой нагрузки (20–60 мг/(м²·сут.)) охватывает западную часть города, где расположен завод по производству азотистых удобрений, а также часть южных кварталов с малоэтажной жилой застройкой. Выявленные закономерности пространственного распределения пылевой нагрузки отражают влияние эффекта «городского острова тепла».
2. Геохимическая характеристика нерастворимой фракции снежного покрова проявляется в пре-

вышении от 2 до 22 раз над фоном концентраций 23 изучаемых химических элементов (U>Yb>Tb>La>Sm>Ba>Ce>Sr>Ca>Ta>Na>Th>Lu>Hf>Nd>Sc>Hg>Co>Fe>Zn>Cs>Sb>Rb), формирующая средний уровень загрязнения снежного покрова (Zc=124). Выявлена полиэлементная геохимическая ассоциация (Sc-Co-Ba-La-Ce-Yb-Lu-Hf-Th-U), характеризующаяся высокими и очень высокими корреляционными связями (r от 0,63 до 0,92) между элементами.

3. По результатам электронной микроскопии обнаружены микрочастицы, состоящие из характерных элементов для нерастворимой фракции снежного покрова, представленные фосфатами цериевыми, сульфатами бария, сульфидами с примесью цинка и железа и ферросферулами.
4. Обработка геохимических данных с помощью факторного, корреляционного, К-средних, кластерного методов анализа позволила выделить атмогеохимические ореолы на территории города, различающихся по уровням накопления и ассоциациям изучаемых химических элементов в нерастворимой фракции снежного покрова, и пространственному расположению. Первый ореол с выраженной полиэлементной ассоциацией (Sc-Fe-Co-Rb-Sr-Cs-Ba-La-Ce-Nd-Eu-Tb-Yb-Lu-Hf-Th-U) охватывает большую часть территории города и связан с распространением выбросов от функционирующих предприятий и автотранспорта. Для второго ореола характерна геохимическая ассоциация Cr-Zn-Br-Sb в нерастворимой фракции снежного покрова, отражающая преимущественно влияние автотранспорта. Третий геохимический ореол с ассоциацией Ca-Cs-Ta-Th-Hg расположен на территориях с наветренной и подветренной стороны от предприятий теплоэнергетики и химической промышленности (коксохимический завод, производство гипохлорита кальция).
5. Геохимические ассоциации макро- и микроэлементов (редкоземельные, радиоактивные, тяжелые металлы, металлоиды и др.) в нерастворимой фракции снежного покрова могут быть использованы в качестве геохимических индикаторов геохимического фона «городского острова тепла», формируемого выбросами теплоэнергетической и химической промышленности (коксохимия, производство азотистых удобрений, гипохлорита кальция), автотранспортом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Nygard T., Valkonen T., Vihma T. Characteristics of Arctic low-tropospheric humidity inversions based on radio soundings // *Atmospheric Chemistry and Physics*. – 2014. – Vol. 14. – P. 1959–1971. DOI: 10.5194/acp-14-1959-2014.
2. Wetzel C., Brummer B. An Arctic inversion climatology based on the European Centre Reanalysis ERA-40 // *Meteorol. Zeitschrift*. – 2011. – Vol. 20 (6). – P. 589–600. DOI: 10.1127/0941–2948/2011/0295.

3. Atlassian E., Vihma T. Evaluation of NWP results for wintertime nocturnal boundary-layer temperatures over Europe and Finland // *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. – 2012. – Vol. 138. – № 667. – P. 1440–1451.
4. Симоненков Д.В. Химический состав антропогенного аэрозоля над промышленными центрами Сибири, Дальнего востока и Казахстана: автореф. дис. ... канд. наук. – Томск, 2015. – 28 с.
5. Pope C.A., Dockery D.W. Health effects of fine particulate air pollution: lines that connect // *Journal of the Air & Waste Management Association*. – 2006. – Vol. 56 (6). – P. 709–742. DOI: 10.1080/10473289.2006.10464485
6. WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. – Geneva, Switzerland: WHO, 2021. – P. 273. URL: <https://iris.who.int/handle/10665/345329> (дата обращения 19.04.2025).
7. Atmospheric depositions of natural and anthropogenic trace elements on the Guliya ice cap (northwestern Tibetan Plateau) during the last 340 years / M.R. Sierra-Hernández, P. Gabrielli, E. Beaudon, A. Wegner, L.G. Thompson // *Atmospheric Environment*. – 2018. – Vol. 176. – P. 91–102. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2017.11.040.
8. Артамонова С.Ю. Уран и торий в аэрозольных выпадениях г. Новосибирска и его окрестностей (Западная Сибирь) // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2020. – Т. 331. – № 7. – С. 212–223. DOI: 10.18799/24131830/2020/7/2731
9. Леженин А.А., Ярославцева Т.В., Рапута В.Ф. Мониторинг аэрозольного загрязнения снежного покрова на основе наземной и спутниковой информации // *Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии*. – 2016. – № 9 (7). – С. 950–959.
10. Measuring Pb isotope ratios in fresh snow filtrate refines the apportioning of contaminant sources in the Arctic / B. Astray, A. Šípková, D. Baragaño, J. Pechar, R. Krejci, M. Komárek, V. Chrastný // *Environmental Pollution*. – 2024. – Vol. 345. – 123457. DOI: 10.1016/j.envpol.2024.123457.
11. Геохимические маркеры застойных зон в городском острове тепла / М.П. Тентюков, К.А. Шукуров, Б.Д. Белан, Д.В. Симоненков, Г.В. Игнатъев, В.И. Михайлов // *Геохимия*. – 2023. – Т. 68. – № 1. – С. 90–104. DOI: 10.31857/S0016752523010089
12. Дудкина О.А., Минина В.И. Антропогенное загрязнение городов и его влияние на население Кемеровской области // *Известия Самарского научного центра РАН*. – 2011. – Т. 13. – № 5. – С. 255–258.
13. Аэрозоли в природных планшетах Сибири / А.П. Бояркина, В.В. Байковский, Н.В. Васильев, Г.Г. Глухов, М.А. Медведев, Л.Ф. Писарева, В.И. Резчиков, С.И. Шелудько. – Томск: Изд-во ТГУ, 1993. – 157 с.
14. Геохимия снежного покрова в Восточном округе Москвы / Н.С. Касимов, Н.В. Кошелева, Д.В. Власов, Е.В. Терская // *Вестник Московского университета*. – Сер. 5: География. – 2012. – № 4. – С. 14–24.
15. Геохимия окружающей среды / Ю.Е. Саэт, Б.А. Ревич, Е.П. Янин и др. – М.: Изд-во «Недра», 1990. – 335 с.
16. Методические рекомендации по геохимической оценке загрязнения территории городов химическими элементами / Б.А. Ревич, Ю.И. Саэт, Р.С. Смирнова, Е.П. Сорокина. – М.: ИМГРЭ, 1982. – 111 с.
17. Методические рекомендации по оценке степени загрязнения атмосферного воздуха населенных пунктов металлами по их содержанию в снежном покрове и почве: утв. Гл. государственным санитарным врачом СССР от 15.05.1990 г., № 5174-90. – М.: ИМГРЭ, 1990. – 17 с.
18. Таловская А.В. Экогеохимия атмосферных аэрозолей на урбанизированных территориях юга Сибири (по данным изучения состава нерастворимого осадка снегового покрова): дисс. ... д-ра геол.-минерал. наук. – Томск, 2022. – 373 с.
19. Язиков Е.Г. Экогеохимия урбанизированных территорий юга Западной Сибири: дис. ... д-ра геол.-минерал. наук. – Томск, 2006. – 423 с.
20. Шатилов А.Ю. Вещественный состав и геохимическая характеристика атмосферных выпадений на территории Обского бассейна: автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – Томск, 2001. – 24 с.
21. Li X.X., Britter R., Norford L.K. Effect of stable stratification on dispersion within urban street canyons: a large-eddy simulation // *Atmos. Environ.* – 2016. – Vol. 144. – P. 47–59. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2016.08.060.
22. Aerodynamic properties of rough surfaces with high aspect ratio roughness elements: effect of aspect ratio and arrangements / J. Sadique, X.I.A. Yang, C. Meneveau, R. Mittal // *Bound.-Layer Meteorol.* – 2017. – Vol. 163 (2). – P. 203–224. DOI: 10.1007/s10546-016-0222-1.
23. Володина Д.А. Влияние цементных заводов на эколого-геохимическую обстановку прилегающих территорий на основе изучения снегового покрова: автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – Томск, 2024. – 22 с.
24. Содержание токсичных элементов в уличной пыли и оценка риска для здоровья человека (Междуреченск, Южный Кузбасс) / Н.А. Осипова, К.Ю. Осипов, А.В. Таловская, Е.Г. Язиков, Е.А. Филимонов, С.А. Новиков // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2023. – Т. 334. – № 3. – С. 229–244. DOI: 10.18799/24131830/2023/3/3974.
25. Геохимия ландшафтов Восточной Москвы / Н.С. Касимов, Д.В. Власов, Н.Е. Кошелева, Е.М. Никифорова / под ред. Н.С. Касимова. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 2016. – 276 с.
26. Новикова В.Д., Таловская А.В., Язиков Е.Г. Динамика пылевой нагрузки и химического состава снегового покрова в районе расположения предприятий теплоэнергетики и коксохимии (на примере г. Кемерово) // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2025. – Т. 336. – № 3. – С. 193–207. DOI: 10.18799/24131830/2025/3/4984
27. Кизильштейн Л.Я. Экогеохимия элементов–примесей в углях. – Ростов-на-Дону: СК НИЦ ВШ, 2002. – 296 с.
28. Арбузов С.И. Металлоносность углей Сибири // *Известия Томского политехнического университета*. – 2007. – Т. 311. – № 1. – С. 77–83.
29. Редкоземельные элементы в позднелазовских углях Северной Азии (Сибирь, Северный Китай, Монголия, Казахстан) / С.И. Арбузов, С.С. Ильенко, В.С. Машенькин, Ю. Сунь, Ц. Жао, М.Г. Блохин, В.В. Иванов, Н.В. Зарубина // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2016. – Т. 327. – № 8. – С. 74–88.
30. Янин Е.П. Эмиссия ртути в окружающую среду при производстве кокса в России. – М.: ИМГРЭ, 2004. – 15 с.

31. Систер В.Г., Корецкий В.Е. Инженерно-экологическая защита водной системы северного мегаполиса в зимний период. – М.: Изд-во ЦентрМГУИЭ, 2004. – 192 С.
32. Кемеровская мэрия прояснила путаницу с противогололедными материалами // VSE42.RU – Кемерово, Россия, 2025. URL: <https://vse42.ru/news/33604710> (дата обращения 19.04.2025).
33. Extream / Химическая продукция для всех отраслей. – Кемерово, Россия, 2025. URL: <https://extream.ru/> (дата обращения 19.04.2025).
34. Source, spatial distribution and pollution assessment of Pb, Zn, Cu, and Pb, isotopes in urban soils of Ahvaz City, a semi-arid metropolis in southwest Iran / A. Nazarpour, M.J. Watts, A. Madhani, S. Elahi // *Scientific Reports*. – 2019. – Vol. 9. – P. 1–11. DOI: 10.1038/s41598-019-41787-w.
35. Tire and road wear particles in road environment – quantification and assessment of particle dynamics by Zn determination after density separation. / P. Klöckner, T. Reemtsma, P. Eisentraut, U. Braun, A.S. Ruhl, S. Wagner // *Chemosphere*. – 2019. – Vol. 222. – P. 714–721. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2019.01.176
36. Antimony in brake pads – a carcinogenic component? / O. Von Uexküll, S. Skerfving, R. Doyle, M. Braungart // *Journal of Cleaner Production*. – 2005. – Vol. 13. – P. 19–31. DOI: 10.1016/J.JCLEPRO.2003.10.008
37. Begak O.Y., Syroezhko A.M. Analysis of impurities in mixtures of West-Siberian crude oils // *Russian Journal of Applied Chemistry*. – 2001. – Vol. 74 – P. 1230–1234. DOI: 10.1023/A:1013056010056
38. Block C., Dams R. Concentration-data of elements in liquid fuel oils as obtained by neutron activation analysis // *Journal of Radioanalytical Chemistry*. – 1978. – Vol. 46. – P. 137–144.
39. A comprehensive assessment of heavy metal contamination in road dusts along a hectic national 180 highway of Bangladesh: spatial distribution, sources of contamination, ecological and human health risks / M.H. Kabir, T. Kormoker, R.S. Shammi, T.R. Tusher, M.S. Islam, R. Khan, A.M. Idris // *Toxin Reviews*. – 2022. – Vol. 41. – № 3. – P. 860–879. DOI: 10.1080/15569543.2021.1952436
40. A review of road traffic-derived non-exhaust particles: emissions, physicochemical characteristics, health risks, and mitigation measures / J.C. Fussell, M. Franklin, D.C. Green, M. Gustafsson, R.M. Harrison, W. Hicks, Y. Zhu // *Environmental Science & Technology*. – 2022. – Vol. 56. – № 11. – P. 6813–6835. DOI: 10.1021/acs.est.2c01072.
41. Physical and chemical properties of non-exhaust particles generated from wear between pavements and tyres / C.A. Alves, A.M.P. Vicente, A. I. Calvo, D. Baumgardner, F. Amato, X. Querol, C. Pio, M. Gustafsson // *Atmospheric Environment*. – 2020. – Vol. 224. – P. 24–35. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2019.117252.

Информация об авторах

Валерия Дмитриевна Новикова, аспирант отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30; vdk10@tpu.ru

Анна Валерьевна Таловская, доктор геолого-минералогических наук, профессор отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30; talovskaya@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2227-2221>

Язиков Егор Григорьевич, доктор геолого-минералогических наук, профессор отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30; yazikovveg@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7925-6249>

Поступила в редакцию: 28.05.2025

Поступила после рецензирования: 02.06.2025

Принята к публикации: 16.06.2025

REFERENCES

1. Nygard T., Valkonen T., Vihma T. Characteristics of Arctic low-tropospheric humidity inversions based on radio soundings. *Atmos. Chem. Phys.*, 2014, vol. 14, pp. 1959–1971. DOI: 10.5194/acp-14-1959-2014.
2. Wetzel C., Brümmer B. An Arctic inversion climatology based on the European Centre Reanalysis ERA-40. *Meteorol. Zeitschrift*, 2011, vol. 20, pp. 589–600. DOI: 10.1127/0941-2948/2011/0295.
3. Atlaskin E., Vihma T. Evaluation of NWP results for wintertime nocturnal boundary-layer temperatures over Europe and Finland. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2012, vol. 138, no. 667. pp. 1440–1451.
4. Simonennkov D.V. *Chemical composition of anthropogenic aerosols over industrial centers of Siberia, the Far East, and Kazakhstan*. Cand. Dis. Tomsk, 2015. 28 p. (In Russ.)
5. Pope C.A., Dockery D.W. Health effects of fine particulate air pollution: lines that connect. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2006, vol. 56, no. 6, pp. 709–742. DOI: 10.1080/10473289.2006.10464485.
6. WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. Geneva, Switzerland, WHO, 2021. 273 p. Available at: <https://iris.who.int/handle/10665/345329> (accessed: 19 April 2025).
7. Sierra-Hernández M.R., Gabrielli P., Beaudon E., Wegner A., Thompson L.G. Atmospheric depositions of natural and anthropogenic trace elements on the Guliya ice cap (northwestern Tibetan Plateau) during the last 340 years. *Atmospheric Environment*, 2018, vol. 176, pp. 91–102. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2017.11.040.

8. Artamonova S.Yu. Uranium and thorium in aerosol fallout in Novosibirsk and its surroundings (Western Siberia). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 7, pp. 212–223. (In Russ.) DOI: 10.18799/24131830/2020/7/2731.
9. Lezhenin A.A., Yaroslavl'tseva T.V., Raputa V.F. Monitoring of aerosol pollution of snow cover based on ground-based and satellite data. *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*, 2016, no. 9 (7), pp. 950–959. (In Russ.)
10. Astray B., Šipková A., Baragaño D., Pechar J., Krejci R., Komárek M., Chrástný V. Measuring Pb isotope ratios in fresh snow filtrate refines the apportioning of contaminant sources in the Arctic. *Environmental Pollution*, 2024, vol. 345, 123457. DOI: 10.1016/j.envpol.2024.123457.
11. Tentyukov M.P., Shukurov K.A., Belan B.D., Simonennkov D.V., Ignatiev G.V., Mikhailov V.I. Geochemical markers of stagnant zones in the urban heat island. *Geochemistry*, 2023, vol. 68, no. 1, pp. 90–104. (In Russ.) DOI: 10.31857/S0016752523010089.
12. Dudkina O.A., Minina V.I. Anthropogenic pollution of cities and its impact on the population of the Kemerovo region. *Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2011, vol. 13, no. 5, pp. 255–258. (In Russ.)
13. Boyarkina A.P., Baykovsky V.V., Vasiliev N.V., Glukhov G.G., Medvedev M.A., Pisareva L.F., Rezhnikov V.I., Sheludko S.I. *Aerosols in natural tablets of Siberia*. Tomsk, Tomsk State University Publ., 1993. 157 p. (In Russ.)
14. Kasimov N.S., Kosheleva N.V., Vlasov D.V., Terskaya E.V. Snow cover geochemistry in the Eastern District of Moscow. *Bulletin of the Moscow University, Series 5: Geograph*, 2012, no. 4, pp. 14–24. (In Russ.)
15. Saet Yu.E., Revich B.A., Yanin E.P. *Environmental geochemistry*. Moscow, Nedra Publ., 1990. 335 p. (In Russ.)
16. Revich B.A., Saet Yu.I., Smirnova R.S., Sorokina E.P. *Methodological recommendations for the geochemical assessment of urban territory pollution by chemical elements*. Moscow, IMGRE Publ., 1982. 111 p. (In Russ.)
17. *Methodological recommendations for assessing the degree of atmospheric air pollution in populated areas by metals based on their content in snow cover and soil*. Approved by the Chief State Sanitary Doctor of the USSR dated 05.15.1990, no. 5174-90. Moscow, IMGRE Publ., 1990. 17 p. (In Russ.)
18. Talovskaya A.V. *Ecogeochemistry of atmospheric aerosols in urbanized areas of southern Siberia (based on the study of the composition of insoluble snow cover sediment)*. Dr. Diss. Tomsk, 2022. 373 p. (In Russ.)
19. Yazikov E.G. *Ecogeochemistry of urbanized territories in the South of Western Siberia*. Dr. Diss. Tomsk, 2006. 423 p. (In Russ.)
20. Shatilov A.Yu. *Material composition and geochemical characteristics of atmospheric precipitation in the territory of the Ob basin*. Cand. Diss. Tomsk, 2001. 24 p. (In Russ.)
21. Li X.X., Britter R., Norford L.K. Effect of stable stratification on dispersion within urban street canyons: a large-eddy simulation. *Atmospheric Environment*, 2016, vol. 144, pp. 47–59. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2016.08.060.
22. Sadique J., Yang X.I.A., Meneveau C., Mittal R. Aerodynamic properties of rough surfaces with high aspect-ratio roughness elements: effect of aspect ratio and arrangements. *Boundary-Layer Meteorology*, 2017, vol. 163, no. 2, pp. 203–224. DOI: 10.1007/s10546-016-0222-1.
23. Volodina D.A. *Influence of cement plants on the ecological and geochemical conditions of adjacent territories based on the study of snow cover*. Cand. Diss. Tomsk, 2024. 22 p. (In Russ.)
24. Osipova N.A., Osipov K.Yu., Talovskaya A.V., Yazikov E.G., Filimonenko E.A., Novikov S.A. Content of toxic elements in street dust and health risk assessment (Mezhdurechensk, Southern Kuzbass). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2023, vol. 334, no. 3, pp. 229–244. (In Russ.) DOI: 10.18799/24131830/2023/3/3974.
25. Kasimov N.S., Vlasov D.V., Kosheleva N.E., Nikiforova E.M. *Geochemistry of landscapes in Eastern Moscow*. Moscow, Moscow University Press, 2016. 276 p. (In Russ.)
26. Novikova V.D., Talovskaya A.V., Yazikov E.G. Dynamics of dust load and chemical composition of snow cover in the area of thermal power and coke-chemical enterprises (case study of Kemerovo). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 3, pp. 193–207. (In Russ.) DOI: 10.18799/24131830/2025/3/4984.
27. Kizil'shtein L.Ya. *Ecogeochemistry of trace elements in coals*. Rostov-on-Don, SK NC VS Publ., 2002. 296 p. (In Russ.)
28. Arbuzov S.I. Metalliferous coals of Siberia. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2007, vol. 311, no. 1, pp. 77–83. (In Russ.)
29. Arbuzov S.I., Ilenok S.S., Mashenkin V.S., Sun Yu., Zhao C., Blokhin M.G., Ivanov V.V., Zarubina N.V. Rare earth elements in Late Paleozoic coals of Northern Asia (Siberia, Northern China, Mongolia, Kazakhstan). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2016, vol. 327, no. 8, pp. 74–88. (In Russ.)
30. Yanin E.P. *Mercury in dust emissions from industrial enterprises*. Moscow, IMGRE Publ., 2004. 24 p. (In Russ.)
31. Sister V.G., Koretsky V.E. *Engineering and environmental protection of the water system of a northern metropolis in winter*. Moscow, MGUE Publ., 2004. 192 p. (In Russ.) Available at: <https://vse42.ru/news/33604710> (accessed: 19 April 2025).
32. *Kemerovo mayor's office clarified confusion with anti-icing materials*. VSE42.RU, Kemerovo, Russia, 2025. (In Russ.) Available at: <https://vse42.ru/news/33604710> (accessed: 19 April 2025).
33. *Extream. Chemical products for all industries*. Kemerovo, Russia, 2025. (In Russ.) Available at: <https://extream.ru/> (accessed: 19 April 2025).
34. Nazarpour A., Watts M.J., Madhani A., Elahi S. Source, spatial distribution and pollution assessment of Pb, Zn, Cu, and Pb isotopes in urban soils of Ahvaz City, a semi-arid metropolis in southwest Iran. *Scientific Reports*, 2019, vol. 9, pp. 1–11. DOI: 10.1038/s41598-019-41787-w.
35. Klöckner P., Reemtsma T., Eisentraut P., Braun U., Ruhl A.S., Wagner S. Tire and road wear particles in road environment – quantification and assessment of particle dynamics by Zn determination after density separation. *Chemosphere*, 2019, vol. 222, pp. 714–721. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2019.01.176.
36. Von Uexküll O., Skerfving S., Doyle R., Braungart M. Antimony in brake pads – a carcinogenic component? *Journal of Cleaner Production*, 2005, vol. 13, pp. 19–31. DOI: 10.1016/J.JCLEPRO.2003.10.008.
37. Begak O.Y., Syroezhko A.M. Analysis of impurities in mixtures of West-Siberian crude oils. *Russian Journal of Applied Chemistry*, 2001, vol. 74, pp. 1230–1234. DOI: 10.1023/A:1013056010056.

38. Block C., Dams R. Concentration-data of elements in liquid fuel oils as obtained by neutron activation analysis. *Journal of Radioanalytical Chemistry*, 1978, vol. 46, pp. 137–144.
39. Kabir M.H., Kormoker T., Shammi R.S., Tusher T.R., Islam M.S., Khan R., Idris A.M. A comprehensive assessment of heavy metal contamination in road dusts along a hectic national highway of Bangladesh: Spatial distribution, sources of contamination, ecological and human health risks. *Toxin Reviews*, 2022, vol. 41, no. 3, pp. 860–879. DOI: 10.1080/15569543.2021.1952436.
40. Fussell J.C., Franklin M., Green D.C., Gustafsson M., Harrison R.M., Hicks W., Zhu Y. A review of road traffic-derived non-exhaust particles: emissions, physicochemical characteristics, health risks, and mitigation measures. *Environmental Science & Technology*, 2022, vol. 56, no. 11, pp. 6813–6835. DOI: 10.1021/acs.est.2c01072.
41. Alves C.A., Vicente A.M.P., Calvo A.I., Baumgardner D., Amato F., Querol X., Pio C., Gustafsson M. Physical and chemical properties of non-exhaust particles generated from wear between pavements and tyres. *Atmospheric Environment*, 2020, vol. 224, pp. 24–35. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2019.117252.

Information about the authors

Valeriia D. Novikova, Postgraduate Student, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation; vdk10@tpu.ru

Anna V. Talovskaya, Dr. Sc., Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation; talovskaya@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2227-2221>

Egor G. Yazikov, Dr. Sc., Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation; yazikoveg@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7925-6249>

Received: 28.05.2025

Revised: 02.06.2025

Accepted: 16.06.2025

УДК 556.314
DOI: 10.18799/24131830/2025/7/5113
Шифр специальности ВАК: 1.6.6
Научная статья

Геохимические типы подземных вод юго-восточного Забайкалья

В.В. Дребот¹✉, О.Е. Лепокурова^{1,2}, С.В. Борзенко³

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

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

³ Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН, Россия, г. Чита

✉ DrebotVV@ipgg.sbras.ru

Аннотация. *Актуальность* работы связана с вопросами формирования разнообразия химических типов подземных вод верхней гидродинамической зоны (от HCO₃-Ca до Cl-Na) юго-восточного Забайкалья, в том числе с солёностью >3 г/л. Существующие гипотезы объясняют это влиянием испарения, тогда как для подземных вод это неочевидно. Между тем выделение геохимических типов вод в рамках общей теории взаимодействия в системе вода–порода может раскрыть механизм формирования вод разного состава и определить этапы соленакопления, а использование данных по содержанию трития поможет оценить продолжительность контакта растворов с вмещающими отложениями и интенсивность водообмена в регионе. *Целью* работы является выделение геохимических типов подземных вод юго-востока Забайкалья и определение необходимых для этого условий на основе имеющейся изотопно-геохимической информации. *Объекты:* подземные воды верхней динамической зоны (59 проб) юго-восточного Забайкалья и региональные атмосферные осадки (6 проб). *Методы.* Макрокомпонентный состав вод определяли титриметрическим, потенциометрическим и фотометрическим методом, атомно-абсорбционной спектрометрией с пламенной атомизацией и пламенной атомно-эмиссионной спектрометрией, микрокомпонентный – с помощью ИСП-МС. Концентрации трития определялись с помощью жидкостинтилляционной спектрометрии. Индексы насыщения были рассчитаны в приложениях для физико-химического моделирования HydroGeo и GWB, базирующихся на методе констант равновесий. *Результаты и выводы.* В юго-восточном Забайкалье формируются три геохимических типа вод: кремнистый, содовый и солосодержащий, а также некоторые их разновидности, которые последовательно сменяют друг друга по мере движения вод от горного обрамления в сторону Торейской впадины. Это объясняется с позиций эволюционного развития в системе вода–порода в зависимости от времени взаимодействия воды с вмещающими отложениями. Показано, что кремнистые воды приурочены к области активного водообмена, их относительный возраст составил не более 50 лет и они находятся на стадии насыщения глинами. Содовые и солосодержащие воды характеризуются замедленным водообменом, их время взаимодействия в системе уже >57 лет, что оказывается достаточным для насыщения относительно большего числа минералов, в том числе кальция, при этом в растворе продолжает аккумулироваться натрий, который не связывается Na-содержащими солями. Интенсивное испарение, смешение с солёными озёрами в зонах локальной трещиноватости и дефляция дополнительно способствуют развитию засоления.

Ключевые слова: геохимические типы вод, система вода–порода, вторичное минералообразование, формирование химического состава, водообмен, тритий, Торейские озера, Восточное Забайкалье

Благодарности: Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ в рамках научного проекта № 24-27-00372.

Для цитирования: Дребот В.В., Лепокурова О.Е., Борзенко С.В. Геохимические типы подземных вод юго-восточного Забайкалья // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 7. – С. 224–237. DOI: 10.18799/24131830/2025/7/5113

UDC 556.314
DOI: 10.18799/24131830/2025/7/5113
Scientific paper

Geochemical types of groundwater in South-Eastern Transbaikalia

V.V. Drebot^{1✉}, O.E. Lepokurova^{1,2}, S.V. Borzenko³

¹ Tomsk Branch of Trofimuk Institute of Petroleum-Gas Geology and Geophysics of SB RAS, Tomsk, Russian Federation

² National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

³ Institute of Natural Resources, Ecology, and Cryology of SB RAS, Chita, Russian Federation

✉ DrebotVV@ipgg.sbras.ru

Abstract. Relevance. The formation of groundwater various chemical types in the upper hydrodynamic zone (from HCO₃-Ca to Cl-Na) of South-Eastern Transbaikalia, with salinities exceeding 3 g/L. Existing hypotheses link this phenomenon to evaporation; however, this is not clearly observed in groundwater. Identifying geochemical water types through the lens of water–rock interaction could illuminate the mechanisms behind differing compositions and reveal stages of salt accumulation. Additionally, data on tritium content may aid in assessing the duration of solution contact with rocks and the water exchange intensity in the area. **Aim.** To identify the groundwater geochemical types in South-Eastern Transbaikalia and determine the necessary conditions for this based on isotopic-geochemical information. **Objects.** Groundwater from the upper dynamic zone (59 samples) in South-Eastern Transbaikalia and regional atmospheric precipitation (6 samples). **Methods.** Water major components were determined using titrimetric, potentiometric, and photometric methods, FAAS and FAES. Trace elements were analyzed using ICP-MS. Tritium concentrations were measured by liquid scintillation spectrometry. Saturation indices were calculated using the HydroGeo and GWB applications for physicochemical modeling based on the equilibrium constant method. **Results and conclusions.** The authors have identified three geochemical water types in South-Eastern Transbaikalia: siliceous, soda, and saline, along with some variations that sequentially replace each other as water moves from the mountainous framing to the Torey depression. This sequence reflects the evolutionary processes in the water–rock system depended on the process duration. Siliceous waters belong to the active water exchange zone, with a relative age of no more than 50 years and saturated with clays. Soda and saline waters exhibit slower exchange, with interaction times exceeding 57 years, facilitating saturation with more minerals, including calcite, while sodium accumulates in unsaturated solutions. Evaporation and mixing with saline lakes contribute to further salinization.

Keywords: geochemical types of water, water–rock system, secondary mineral formation, chemical composition formation, water exchange, tritium, Torey lakes, Eastern Transbaikalia

Acknowledgements: The research was financially supported by the RSF within scientific project no. 24-27-00372.

For citation: Drebot V.V., Lepokurova O.E., Borzenko S.V. Geochemical types of groundwater in South-Eastern Transbaikalia. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 7, pp. 224–237. DOI: 10.18799/24131830/2025/7/5113

Введение

Понятие «*геохимический тип вод*» было введено профессором С.Л. Шварцевым [1, 2] в рамках развиваемой им концепции о равновесно-неравновесном состоянии системы вода–порода, согласно которой состав воды определяется разностью между растворимыми горными породами и образующимися вторичными минералами. В отличие от классического и принятого в гидрогеологии «химического типа воды», характеризующего растворы по преобладающим анионам и катионам, геохимическая классификация является *генетической*, т. е. название даётся в зависимости от набора равновесных с водой вторичных отложений (например, Al, Si в составе глин), образующихся в данной среде, и некоторым её особенностям, тем самым указывая на механизм фор-

мирования этих вод. Всего С.Л. Шварцевым выделено семь основных типов [1], которые в свою очередь делились на подтипы. В последующих работах его ученики дополняли их на примерах разных регионов [3–9], что позволяло детальнее проиллюстрировать механизмы формирования вод.

В данной работе в качестве объекта исследования выбраны подземные воды верхней динамической зоны юго-восточного Забайкалья, интересные из-за пестроты химического состава (от HCO₃-Ca до Cl-Na) и разнообразия вмещающих пород (от базальтов до глин), засушливого климата и наличия гидравлической связи с широко распространёнными здесь солёными озерами. Авторы достаточно хорошо изучили воды на химический [10], микрокомпонентный и изотопный состав [11, 12], прове-

ли расчеты равновесия со вторичными минералами [13, 14], особенно в связи с процессами содобразования. Согласно концепции С.Л. Шварцева, содобразование – это определенный этап взаимодействия в системе вода–порода, наступающий с момента насыщения вод кальцитом, а геохимический тип таких вод, соответственно, назван щелочным карбонатно-кальциевым (или по-другому – содовым). При этом, как показано в работах [9, 14–16], для достижения такого равновесия необходимо определенное время, для оценки которого в данной работе дополнительно был изучен тритий (^3H). Тритий – сверхтяжелый изотоп водорода, который используется гидрогеологами по всему миру для оценки времени пребывания подземных вод в водоносных горизонтах [17–31]. Это связано с тем, что ^3H не образуется в подземных водах, а поступает в зону аэрации только с атмосферными осадками, т. е. его количество уменьшается во времени строго в соответствии с уравнением радиоактивного распада. Данный подход также имеет ряд недостатков, связанных, в частности, с определением входной функции (восстановление значений трития в региональных осадках области питания с учетом сезонности и времени пребывания в зоне аэрации и др.). В этой связи авторы не ставят перед собой задачу точно определить возраст исследуемых подземных вод, а предлагают использовать значения ^3H в качестве показателя, контролирующего водообмен. Таким образом, целью настоящей работы является выделение геохимических типов подземных вод верхней динамической зоны юго-востока Забайкалья и определение необходимых для этого геохимических условий на основе имеющейся изотопно-геохимической информации, а также иллюстрация последовательности формирования этих типов в формате концептуальной модели.

Объект исследования

Район исследования находится на юго-востоке Забайкальского края и простирается в пределах от 49° до 51° с.ш. и от 114° до 117° в.д (рис. 1, б). Южная граница территории совпадает с государственной границей между Россией и Монголией. Пробоотбор выполнялся на российской стороне вокруг самых крупных водных объектов региона – трансграничных озёр Зун- и Барун-Торей, водосборная площадь которых почти полностью находится в Монголии, а сама территория относится к Монгольской степной провинции и характеризуется недостаточностью увлажнения с обилием солнечного света. Абсолютные отметки постепенно понижаются от ~ 900 м (в горном обрамлении) и достигают 591,4 м на дне озера Барун-Торей.

Климат здесь близок к монгольскому, который является самым резко континентальным в мире.

Это объясняется расположением района исследований почти в самом центре Азии. Осадки (322 мм) лишь немного превышают испарение (318 мм) в водном балансе территории [32]. Кроме того, район исследований подвержен пыльным бурям, приходящим с территории Монголии, что усиливает влияние атмосферного переноса. Такая экологическая переходная зона считается крайне уязвимой к будущим климатическим изменениям, и северо-восточная Азия действительно испытала один из самых сильных сигналов потепления на Земле [33]. Резко континентальный полусухой климат и межгодовые колебания общей увлажненности территории приводят к значительной сезонной и более долгосрочной изменчивости гидрологического режима озёр. Это выражается в том, что раз в 25–30 лет широко распространённые солёные озера здесь практически полностью пересыхают, после чего наступает фаза увлажнения и они снова наполняются водой. Уровень подземных вод в это время также меняется. Последний маловодный период в регионе наблюдался в период с 1999 по 2021 гг. [34], который повлек за собой иссушение наиболее крупных озёр Барун-Торей и Зун-Торей. С 2020 г. русла рек Удзы и Ималки на территории России начали наполняться водой и в 2021 г. вода на 80 % заполнила котловину оз. Барун-Торей, в то время как котловина оз. Зун-Торей оставалась сухой.

Учитывая низкую степень антропогенной нагрузки в районе, предыдущими исследованиями было показано [13], что основными источниками макро- и микрокомпонентного состава подземных вод выступают вмещающие породы, которые здесь представлены палеозойскими, мезозойскими и кайнозойскими образованиями. На излияе скважин юго-восточного обрамления Торейской впадины было установлено наличие оливкового метадолерита и метабазальта, в составе которых присутствуют в разных соотношениях первичные минералы: основные плагиоклазы, клинопироксен, титаномagnetит и оливин. Среди вторичных минералов встречаются: хлориты, кремнистое вещество, каолинит, Ca-Mg-K-Na-Fe-монтмориллонит, альбит, кальцит. В пределах территории фиксируется также множество проявлений рудной минерализации, которые не имеют промышленного значения, но являются составной частью водовмещающих пород и могут выступать дополнительными источниками микроэлементов вод. Кроме того, котловины некоторых озёр содержат отложения поваренной соли, соды и сульфата натрия, которые выступают дополнительными источниками катионов и анионов.

Исследуемые подземные воды локализованы в пределах Торейского артезианского бассейна монгольского типа. Водоносные комплексы района в зависимости от условий залегания подземных вод,

их возраста и типа циркуляции относят либо к пластовому типу (N-Q), либо к трещинным водам (K₁, PZ-MZ, yMZ). Выделение водоносных горизонтов достаточно условно, поскольку воды, циркулирующие в трещиноватых породах разного возраста и состава, образуют единую гидравлически связанную систему со схожими условиями циркуляции. Питание осуществляется преимущественно атмосферными осадками по всей площади распространения трещиноватых пород горного обрамления территории, в том числе в восточных отрогах хребта Хэнтэй на монгольской стороне, который является мировым водоразделом между бассейнами Северного Ледовитого и Тихого океанов, с одной стороны, и бессточными бассейнами Средней Азии – с другой. Это подтверждается результатами многочисленных исследований изотопного состава воды в регионе [11, 12, 14]. Солонцы в области внутреннего стока при увлажнении становятся вязкими и водонепроницаемыми, затрудняя атмосферное питание. Движение вод предопределено геоморфологической позицией водовмещающего комплекса и в общем плане направлено от водоразделов в долины [35]. Таким образом, район исследований представляет собой по большей части закрытую-бессточную межгорную структуру, замкнутый характер которой, отсутствие подземного и поверхностного стоков, значительный дефицит увлажнения, интенсивное испарение и другие факторы определяют застойный режим подземных вод и, как следствие, затрудненные условия водообмена [36].

Методы исследования

В работе использованы данные гидрохимического опробования, проведенного в летние полевые сезоны с 2017 по 2021 гг. совместными усилиями сотрудников Института природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН (ИПРЭК СО РАН, г. Чита) и Томского филиала Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН. Всего было отобрано 59 проб подземной воды верхней гидродинамической зоны из родников, колодцев и скважин глубиной до 70 м. Несмотря на то, что основной акцент был сделан на опробовании подземных вод, для изучения источников питания собирали также атмосферные (дождевые) осадки в количестве 6 проб. Технология пробоотбора была подробно описана в работах [10, 13, 14]. Пробы отфильтровывали через мембранный фильтр с размером пор 0,45 мкм.

Макрокомпонентный состав исследуемых вод определяли стандартными методами, также описанным ранее в публикациях [10, 13, 14] в ближайшей к району исследования аттестованной лаборатории геоэкологии и гидрогеохимии ИПРЭК СО РАН, микрокомпоненты в составе воды определяли

методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ИСП-МС) в Проблемной научно-исследовательской лаборатории гидрогеохимии Томского политехнического университета и Аналитическом центре Института геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН (г. Иркутск). Температура, pH, Eh раствора определялись на месте *in situ* с помощью мультиметра AMTAST AMT03 (США). Концентрации трития определялись в восьми точках опробования в лаборатории ядерной океанологии Тихоокеанского океанологического института ДВО РАН (г. Владивосток) методом жидкосцинтилляционной спектрометрии на низкофоновом жидкосцинтилляционном счетчике QUANTULUS 1220.

В рамках данной работы для ориентировочных расчетов была использована формула (1) (поршневая модель) [17]:

$$t = \frac{1}{\lambda} \ln \left(\frac{C_0}{C} \right), \quad (1)$$

где t – «возраст» воды; λ – константа распада трития, равная $0,055 \text{ год}^{-1}$; C_0 – исходная концентрация трития в атмосферных осадках (в нашем случае – в реке Ульда – 27,0 ТЕ); C – концентрация трития в подземных водах.

Поскольку в рамках данного исследования тритий в атмосферных осадках региона, к сожалению, не определялся, в качестве исходной концентрации ^3H было принято его содержание в единственной крупной реке, питающей Торейские озера, – Ульдзе, которое находится на уровне 27 ТЕ и является одним из самых высоких среди изученных вод, т. е. вода имеет молодой «возраст». Река имеет преимущественно атмосферное питание и ожидается, что содержание ^3H здесь определяется главным образом его концентрациями в атмосферных осадках, выпадающих на водосборную площадь [17].

Для оценки степени насыщения исследуемых вод относительно минералов вмещающих пород в данном исследовании использовались индексы насыщения (saturation index – SI), опубликованные ранее в нашей работе [13]. Они были рассчитаны в программных комплексах HydroGeo (Россия) и GWB (США), которые основаны на методе констант равновесий, где в качестве входных данных использовались содержания растворённых элементов в растворе. Список минералов, который был учтен при моделировании в системе вода–порода основан на составе образцов, отобранных в районе исследования и подробно описанных в главе «Объект исследования» данной работы, а также литературных данных. Полученные результаты визуализировали с помощью графиков, построенных в MS Excel в сочетании с возможностями Adobe Illustrator. Название химического типа вод давалось по Щукареву, т. е. по убыванию содержаний основных катионов и анионов с концентрациями вы-

ше 25 мг-экв. % в растворе. Статистическая обработка данных осуществлялась в программном пакете Statistica с учетом соответствия нормальному или логнормальному законам распределения. Геообработка и картографический материал выполнялись в программном комплексе ArcGIS. Контур водосбора Торейских озёр строился с помощью комплекса инструментов группы Гидрология, где в качестве входных данных используется цифровая модель рельефа исследуемой территории. Карта распределения химических подземных вод построена с помощью интерполяции поверхности методом обратно взвешенных расстояний (ОВР).

Результаты исследования

Химический состав исследуемых подземных вод и атмосферных осадков региона

Исследуемые подземные воды преимущественно являются гидрокарбонатными, их химический состав представлен в форме диаграммы Пайпера на рис. 1, а, а подробная характеристика уже была представлена в работах [10, 13, 14]. По преобладающему катиону можно выделить три основных химических типа: 1) кальциевые воды, на долю кото-

рых приходится не более 20 %, 2) магниевые воды, число которых не превышает 16 %, 3) самые распространённые – натриевые, их распределение по территории представлено на рис. 2, б. Исключение составляют две скважины: Cl-Na типа на водосборе хлоридного оз. Горбунка и SO₄-Na типа на правом берегу оз. Барун-Торей.

По условиям пространственного залегания было выделено две группы подземных вод: воды водосборного бассейна Торейских озёр и воды за его пределами, в обрамлении Торейской впадины, т. е. расположенные дальше относительно озёр и на более высоких отметках рельефа. Общая минерализация исследуемой воды варьирует в широких пределах от 0,2 г/л (соответствует HCO₃-Ca химическому типу) до максимальной 3,2 г/л (соответствует SO₄-Na водам). При этом рост солёности отмечается с севера и северо-запада (в обрамлении Торейской впадины) на юг в сторону озёр (область водосбора) (рис. 2, б). Наиболее минерализованные воды (более 1 г/л) отобраны у береговой линии озёр.

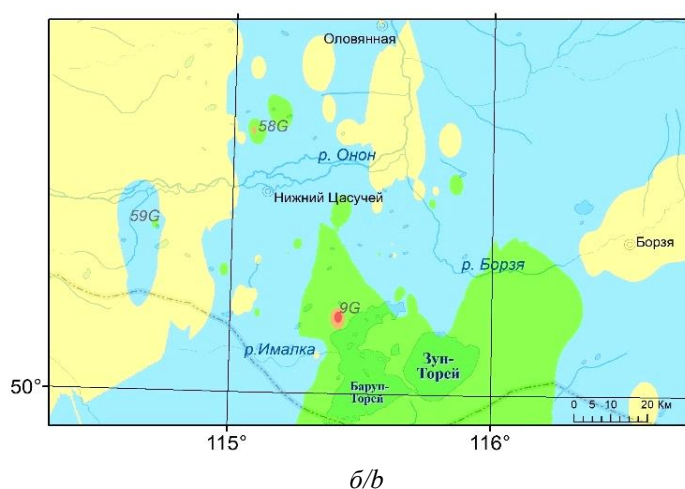
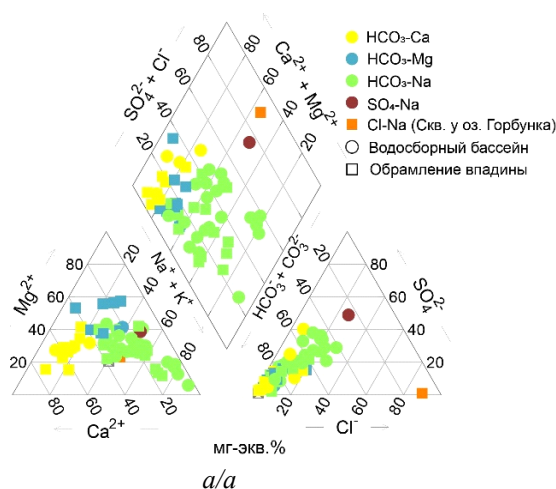


Рис. 1. Диаграмма Пайпера, иллюстрирующая состав подземных вод с учётом химических типов (а) и их распределение по территории (б)

Fig. 1. Piper diagram illustrating the groundwater composition taking into account chemical types (a) and their distribution over the territory (b)

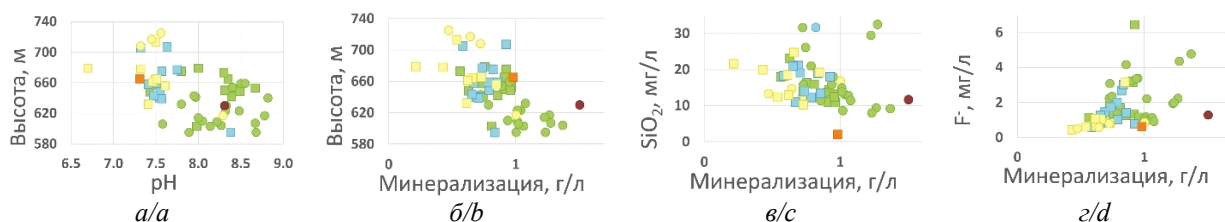


Рис. 2. Зависимость абсолютной высоты пробоотбора от pH (а), минерализации от высоты (б), содержания F⁻ (в) и SiO₂ (г) в исследуемых подземных водах (условные обозначения – на рис. 1, а)

Fig. 2. Relationship between elevations and pH (a), TDS with elevations (b), F⁻ (c) and SiO₂ (d) contents in the studied groundwater (symbols are in Fig. 1, a)

Преобладание определенного катиона контролируется солёностью и pH воды (рис. 2, а, б): Ca^{2+} превалирует при минерализации до 0,6 г/л и pH до 7,4, Mg^{2+} – при солёности от 0,5 до 0,8 г/л и pH 7,4–7,8, Na^+ , соответственно, при более высоких значениях pH и солёности. Сульфат-ион присутствует в количествах, достаточных для определения химического типа, и при солёности 1,1 г/л и pH 8,3 г/л может входить в формулу ионно-солевого состава (>25 мг-экв. %). Кроме основных ионов во всех подземных водах в относительно высоких концентрациях отмечаются F^- и SiO_2 . При этом в обрамлении впадины с ростом солёности содержания F^- увеличиваются, а SiO_2 , наоборот, снижаются (рис. 2, в, г).

Атмосферные осадки региона являются ультрапресными (10–120 мг/л), слабокислыми (pH 6,0–6,8), сложного катионного и анионного составов, но в основном преобладают HCO_3^- , реже SO_4^{2-} . Химический состав в целом сопоставим с усредненными данными по г. Улан-Батор (Монголия) за многолетний период [37] и содержаниями зон недостаточного увлажнения бывшего СССР [1].

Тритий (^3H) в исследуемых водах

В данной работе тритий предлагается использовать для оценки относительного «времени» нахождения исследуемых вод в водоносных горизонтах исходя из представлений о том, что чем выше значения ^3H в воде, тем моложе её возраст. Такой подход позволит предположить время и характер водообмена, что внесет ясность при выделении геохимических типов воды. Показано, что все опробованные подземные воды являются тритийсодержащими, т. е. относительно молодыми. Содержания ^3H в водах рассматриваемой территории изменяются в диапазоне от 1,7 до 27,0 Т.Е. (тритиевых единиц) (табл. 1).

Таблица 1. Содержание ^3H в подземных водах и в р. Ульдзе, их «возраст» в зависимости от химического типа и абсолютной высоты в районе исследований

Table 1. ^3H content in groundwater and in the Uldza River, their "age" depending on the chemical type and absolute altitude in the study area

Точка опробования Sampling point	Химический тип воды Water chemical type	Высота, м Elevation, m	TE/TU	t, л t, year
61G	$\text{HCO}_3\text{-Ca}$	717	12,1	40,7
63G		708	27,8	17,7
64G		725	16,7	29,4
66G	$\text{HCO}_3\text{-Mg-Na}$	649	2,32	>90
67G	$\text{HCO}_3\text{-Na}$	609	8,66	56,7
68G		595	5,55	88,5
69G		632	1,73	>90
9R (р. Ульдза Uldza River)	$\text{HCO}_3\text{-Ca-Mg}$	604	27,0	–

Хорошо прослеживается зависимость концентраций трития от гипсометрического положения точек опробования: с уменьшением высоты и продвижением вод от областей питания в сторону озер Т.Е. становится меньше, т. е. увеличивается возраст вод (рис. 3). Так, зону замедленного водообмена можно условно выделить по концентрациям трития в интервале 1,7–8,7 Т.Е., активного – 12–28 Т.Е. В качестве границы между двумя зонами можно условно принять значение трития 10 Т.Е. Таким образом, условный «возраст» подземной воды зоны активного водообмена находится в пределах от 17 до 40 лет, а замедленного >57 лет (табл. 1). Более молодые воды по химическому типу являются гидрокарбонатными кальциевыми, а по мере увеличения «возраста» воды и движения в область внутреннего стока в сторону понижения отметок рельефа начинает преобладать доля натрия и состав постепенно сменяется с $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ на $\text{HCO}_3\text{-Mg-Na}$, и на последующей стадии формирования состава становится – $\text{HCO}_3\text{-Na}$.



Рис. 3. Расположение точек отбора подземной воды в зависимости от высоты и ^3H

Fig. 3. Layout of groundwater sampling points depending on elevation and ^3H

Равновесие исследуемых вод с основными минералами вмещающих пород

Известно, что химический состав подземных вод определяется разностью между элементами, которые поступают в раствор из растворяемых горных пород, и той частью элементов, которые связываются вторичными минералами. Этот набор формирующихся вторичных фаз представляет собой необходимое геохимическое условие для образования того или иного геохимического типа воды [2]. В этой связи определение, относительно каких минералов подземные воды достигли насыщения, а какие продолжают растворяться, является важной частью исследования. При этом наибольший интерес представляет характер равновесия воды именно с широко развитыми на территории базальтами (раннемеловые андезиты-базальты тургинской свиты), поскольку известно, что равновесие воды относительно этих минералов не достигается, поэтому это равновесно-неравновесное состояние можно считать начальной точкой эволюции состава вод [2].

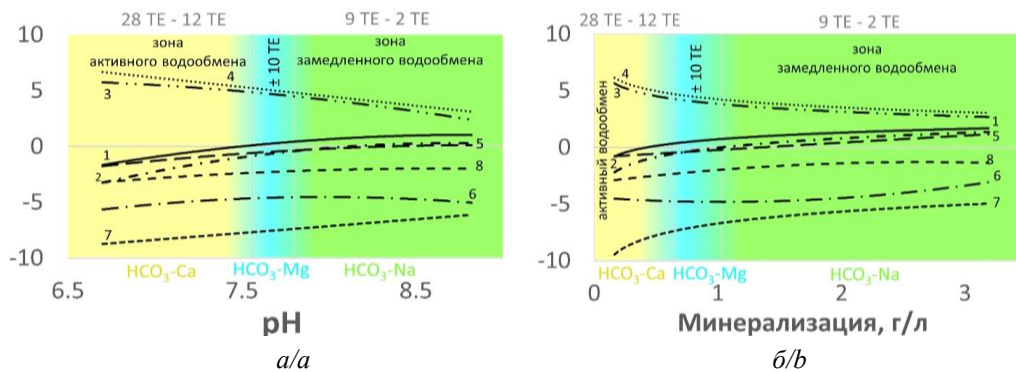


Рис. 4. Индекс насыщения вод по отношению к минералам вмещающих пород в зависимости от а) pH воды и б) солёности: 1 – кальцит, 2 – магнезит, 3 – каолинит, 4 – монтмориллонит, 5 – альбит, 6 – анортит, 7 – галит, 8 – гипс

Fig. 4. Water saturation index in relation to minerals of host rocks depending on a) water pH and b) salinity: 1 – calcite, 2 – magnesite, 3 – kaolinite, 4 – montmorillonite, 5 – albite, 6 – anorthite, 7 – halite, 8 – gypsum

Для иллюстрации этого процесса в данной работе были использованы SI исследуемых вод относительно минералов вмещающих пород, подобные расчёты которых уже были ранее приведены в [10, 13]. Для удобства SI представлены в виде графиков, учитывающих также химических тип вод и значения трития (рис. 4).

Показано, что все без исключения подземные воды далеки от насыщения относительно породообразующих алюмосиликатов (например, анортита), но находятся на стадии насыщения относительно вторичных глинистых минералов (например, каолинита и монтмориллонита). Что касается карбонатов, то хорошо видно (рис. 4), как по мере уменьшения содержаний трития (с 27 до 12 ТЕ) с параллельным увеличением pH и солёности до 7,2 и 0,3 г/л, соответственно, сначала достигается насыщение доломитом, а затем при более высоких значениях pH и минерализации (7,4 и 0,4 г/л) – с кальцитом и магнезитом. Это сопровождается сменой химического типа исследуемых вод с $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ в обрамлении Торейской впадины через $\text{HCO}_3\text{-Mg}$ на $\text{HCO}_3\text{-Na}$ в области сброса. На более поздних этапах взаимодействия $\text{HCO}_3\text{-Na}$ воды, которым соответствуют значения трития в воде от 9 ТЕ и ниже, достигают линии насыщения альбитом. Это даёт основание предположить, что насыщение исследуемых вод после попадания атмосферных осадков в зону аэрации относительно глинистых минералов достигается относительно быстро. Формирование $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ подземных вод, для которых характерны наиболее высокие показатели ^3H (12–28 ТЕ), происходит на протяжении ~40 лет в условиях ненасыщенности к кальциту. Замкнутый характер Торейской впадины способствует формированию застойного режима в области внутреннего стока и в случае, если вода не покидала водоносный горизонт на протяжении ~57 лет, устанавливается насыщение к кальциту, а исследуемые воды постепенно приобретают

$\text{HCO}_3\text{-Na}$ состав. Это хорошо согласуется с концепцией содообразования С.Л. Шварцева [1, 15], согласно которой для накопления соды необходимо большее время взаимодействия вод с вмещающими породами. При этом видно, что ни одна проба не достигла насыщения с хлоридами (галит) и сульфатами (гипс).

Геохимические типы исследуемых подземных вод

На основе классификации, предложенной С.Л. Шварцевым [1], в районе Торейских озёр Забайкалья были выделены три геохимических типа подземных вод: *кремнистый*, *содовый* и *солеосодержащий* и некоторые их разновидности (табл. 2), распространённость которых на территории представлена на рис. 5. Они различаются не только по составу равновесных минералов, но и по общей солёности вод, pH, Eh, и концентрациям характерных элементов.

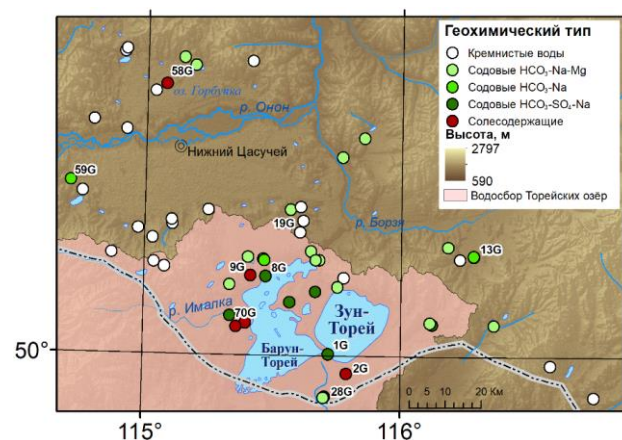


Рис. 5. Распространённость геохимических типов исследуемых подземных вод

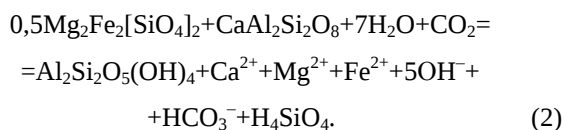
Fig. 5. Distribution of geochemical types of studied groundwater

Таблица 2. Геохимические типы подземных вод района Торейских озёр

Table 2. Geochemical types of groundwater in the Torey Lakes region

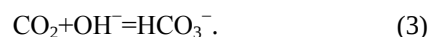
Геохимический Geochemical		Контролирующие показатели Control indicators	Необходимое геохимическое условие Necessary geochemical condition		Вторичные минералы, равновесные с водой Secondary minerals in equilibrium with water	Возраст воды Water age	Водообмен Water exchange	Территория Area
тип вод water type	подтип вод water subtype		равновесие вод с waters equilibrium with	H ³				
Кремнистый Siliceous	Кремнистый Ca-Na-Mg-K Siliceous Ca-Na-Mg-K	pH, Si, K, HCO ₃ ⁻ , Ca, Mg, Na, K	каолинитом, монтмориллонитами Ca, Mg, Na, K kaolinite, montmorillonites Ca, Mg, Na, K	12 TE – 28 TE / 2 TU – 28 TU	Каолинит, монтмориллонит Kaolinite, montmorillonite	<50 лет <50 years	Активный Active	За пределами водосбора Торейских озёр Beyond the Torey lake depression
	Кремнистый Ca-Fe Siliceous Ca-Fe	pH, Si Ca, Fe	дафнитом, сидеритом daphnite, siderite		Дополнительно: сидерит Additionally: siderite			
	Кремнистый Ca-Mn Siliceous Ca-Mn	pH, Si Ca, Mn	родохрозитом rhodochrosite		Дополнительно: родохрозит Additionally: rhodochrosite			
Содовый Soda	Кремнистый карбонатно-кальциевый Siliceous calcium-carbonate	pH, HCO ₃ ⁻ , Ca, Si, K	кальцитом, монтмориллонитами calcite, montmorillonites	2 TE – 9 TE / 2 TU – 9 TU	Каолинит, иллит, Мт, кальцит, мусковит Kaolinite, illite, Mt, calcite, muscovite	>57 лет >57 years	Замедленный Slow	Водосбор Торейских озёр Torey lake catchment
	Кремнисто карбонатный кальциево-фтористый Siliceous carbonate-calcium fluoride	pH, HCO ₃ ⁻ , Ca, Si, F	кальцитом, монтмориллонитом, флюоритом calcite, montmorillonite, fluorite		Дополнительно: флюорит Additionally: fluorite			
Солесодержащий Saline	Кремнистые сульфатно-натриевые Siliceous sodium-sulfate	pH, HCO ₃ ⁻ , Cl ⁻ , Ca, Si, Mg	кальцитом, альбитом, хлоритом calcite, albite, chlorite	<2 TE / <2 TU	Каолинит, Мт, кальцит, мусковит, хлорит, анальцим Kaolinite, Mt, calcite, muscovite, chlorite, analcime	>90 лет >90 years		

Концептуальную модель формирования выделенных геохимических типов можно представить следующим образом. Как было показано ранее [11, 12], исследуемые воды имеют метеорный генезис, т. е. основным источником питания здесь являются слабокислые и нейтральные ультрапресные атмосферные осадки с минерализацией до 0,12 г/л, которые, попадая в зону аэрации, начинают интенсивно растворять вмещающие породы: песчаники, гранитоиды, эффузивные породы и др. Этот процесс, сопровождающийся ростом всех компонентов раствора, т. е. солёности и щёлочности вод, и может быть представлен на примере реакции растворения алюмосиликатов основного состава (анортита и оливина) (2), к которым воды не достигают равновесия:



При гидролизе всегда выделяется группа OH⁻, что ведет к постоянному подщелачиванию раствора. Часть аниона сразу нейтрализуется углекислотой (CO₂), всегда присутствующей в зоне активно-

го водообмена при растворении почвенного и подпочвенного органического вещества (3), что представляет собой биогенный этап формирования и из-за чего подземные воды на начальном этапе всегда являются гидрокарбонатными по составу.



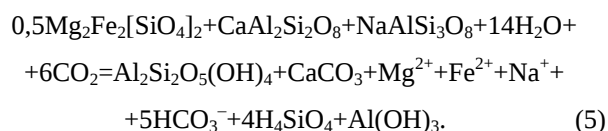
В катионном составе вод изначально превалирует Ca²⁺, иногда Ca²⁺ и Mg²⁺ из-за их высоких кларков в породах и сильной миграционной способности. Так, по достижении минерализацией значений >0,2 мг/л и pH > 7,1 формируется первый геохимический тип подземных вод – кремнисто-кальциевый или кремнисто-магнийевый, для которого характерно равновесие с глинами (рис. 4). В общем виде формула Курлова (4) для усреднённого состава данного типа выглядит следующим образом:

$$M_{0,5} \frac{\text{HCO}_3}{\text{Ca}^{2+} + 40\text{Mg}^{2+} + 39\text{Na}^{+21}} \text{pH}_{7,4}. \quad (4)$$

Исходя из расчетов по тритию воды данного типа являются самыми молодыми, относятся к зоне активного водообмена в обрамлении Торейской впадины и чаще всего выходят за пределы водо-

сбора непосредственно самих Торейских озер к северу, охватывая частично бассейн р. Онон (рис. 5). Высокая степень интенсивности выщелачивания горных пород и формирование каолинита с монтмориллонитами проявляется в снижении содержаний SiO_2 (рис. 2), которые начинают постепенно выходить из раствора на данном этапе. Поскольку часть точек опробования, отобранных в зонах марганцевой минерализации, достигают насыщения относительно родохрозита, а также дафнита и сидерита (расчеты опубликованы в [10, 13]) в пределах кремнисто-кальциевого геохимического типа были выделены и более редкие разновидности: *кремнисто-кальциево-марганцевый* и *кремнистый кальциево-железистый*.

По мере движения подземной воды от горного обрамления в сторону Торейской котловины возрастает время взаимодействия вод (~50 лет и более) с вмещающими породами, что ведет к еще большему увеличению солёности и pH. При минерализации $>0,5$ г/л, $\text{pH} > 7,5$ воды достигают равновесия с кальцитом и другими карбонатами (рис. 4). Реакция гидролиза (5) может принять следующий вид:



С этого момента вода приобретает характерный для района исследований HCO_3^- -Na состав, формируя второй и самый распространённый в районе исследований геохимический тип воды – *кремнистый карбонатно-кальциевый (или по-другому – содовый)*, наступающий с момента достижения равновесия воды с кальцитом [15]. Это приводит к тому, что Na^+ начинает интенсивно аккумулироваться в водах, а концентрации Ca^{2+} снижаются (связываясь кальцитом и др. карбонатами). При этом, как видно из реакции (5), кремний продолжает уходить из раствора во вторичные отложения, что приводит к дальнейшему снижению SiO_2 .

В существующих природных условиях содовые воды в чистом виде формируются редко, поэтому внутри этого типа хорошо выделяются три основные подгруппы. Первая – это содовые воды обрамления Торейской впадины, которые отличаются наибольшим распространением по территории. По составу эти воды гидрокарбонатные натриевые, с высокой долей магния в составе, который почти всегда входит в формулу ионно-солевого состава вторым:

$$M_{0,9} \frac{\text{HCO}_3^- 62\text{SO}_4^{2-} 22}{\text{Na}^+ 50\text{Mg}^{2+} 29\text{Ca}^{2+} 21} \text{pH}_{8,2}.$$

Это хорошо коррелирует со степенью насыщения воды на данном этапе магнезитом (рис. 5), который

еще продолжает формироваться, что обеспечивает остаточное присутствие элемента в растворе.

К содовым водам в чистом виде можно отнести только четыре точки опробования: например, воды точки 8G самоизливающейся скважины с максимальным для всех подземных вод территории pH, доходящим до 8,8. Стабильным содовым составом отличается также скважина 13G в районе оз. Борзинского, которое было детально изучено в работе [16] как самое щелочное в районе. В целом формула Курлова для данного подтипа может выглядеть так:

$$M_{1,1} \frac{\text{HCO}_3^- 70\text{SO}_4^{2-} 17}{\text{Na}^+ 73\text{Ca}^{2+} 13\text{Mg}^{2+} 12} \text{pH}_{8,6}.$$

Помимо натрия, воды обогащаются и другими химическими элементами, среди которых выделяется фтор. При этом хорошо видно (рис. 2), как F^- в воде по мере трансформации химического состава сначала непрерывно растёт до 1 мг/л, а после этого снижается. По-видимому, это связано с достижением частью исследуемых опробований насыщения относительно флюорита, что было показано в [10, 13]. Благодаря чему внутри содового геохимического типа можно, например, выделить *кремнисто-карбонатный кальциево-фтористый* ввиду достижения исследуемой подземной водой насыщения соответствующими минералами. Среди карбонатов, помимо кальцита и магнезита, вода, в зависимости от состава вмещающих отложений, достигает равновесия и, например, с сидеритом или наиболее характерным для содовых вод давсонитом [10, 13], что позволяет согласно классификации С.Л. Шварцева выделить также *кремнисто-карбонатный кальциево-давсонитовый* тип подземных вод. Все они также выводят Ca, Mg или Fe из воды, после чего Na будет становиться лидирующим катионом.

В условиях полуаридного климата интенсивное испарение может играть ключевую роль в формировании выделенных геохимических типов подземных вод как напрямую через испарительное концентрирование приповерхностных водоносных горизонтов, ускоряя тем самым процессы взаимодействия в системе вода–порода, так и через дефляцию с водосборов солёных озёр. На пике аридизации климата площадь акваторий многих озер в районе уменьшается, их минерализация возрастает [38], увеличивается потенциал образования в рапах этих водоемов сульфатных и хлоридных солей, которые затем с ветром (в том числе и с Монголии) попадают в атмосферу и разносятся по водосборным площадям. На атропогенном этапе солёность и концентрация натрия в осадках выше, чем средние показатели по г. Улан-Батор, т. е. вода активно обогащается солями местного генезиса, которые

затем растворяются и с водой возвращаются в зону аэрации. Этот круговорот существует постоянно, активизируясь и замедляясь в разные фазы сложного гидрологического режима региона, поэтому на литогенном этапе система всегда работает в среде с повышенной солёностью. При этом вода обогащается сульфатами быстрее, чем хлоридами, потому что кларк серы в 2,8 раз выше [1].

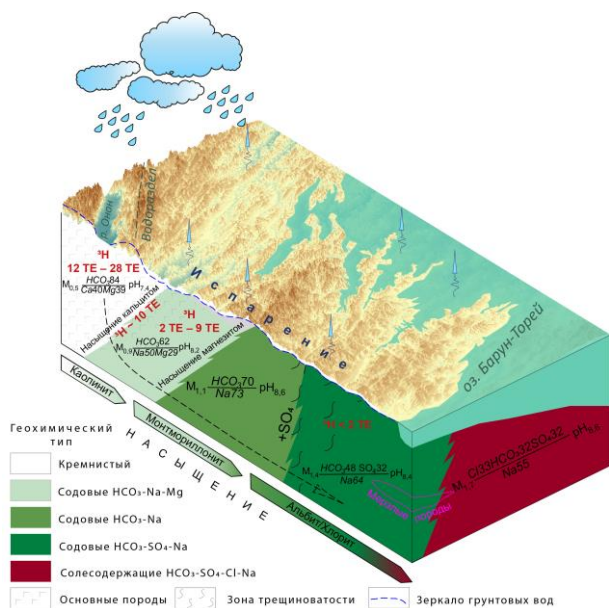


Рис. 6. Концептуальная модель формирования геохимических типов подземных вод юго-восточного Забайкалья

Fig. 6. Conceptual model of groundwater geochemical types formation in South-Eastern Transbaikalia

Дополнительным источником сульфатов, а также и других элементов в воде, таких как медь или цинк, могут служить и распространенные в обрамлении Торейской впадины проявления сульфидной минерализации, что также объясняет рост содержания SO_4^{2-} локально на удалении от области внутреннего стока. Все это приводит к формированию сначала самых соленых среди содовых подземных вод с высокой долей SO_4^{2-} , где сульфат нередко входит в формулу вторым:

$$M_{1,4} \frac{\text{HCO}_3^- 48 \text{SO}_4^{2-} 32 \text{Cl}^- 17}{\text{Na} + 64 \text{Mg}^{2+} + 22 \text{Ca}^{2+} + 13} \text{pH}_{8,4}$$

и последнего геохимического типа в регионе – *солеосодержащего*, воды которого в основном отбирались из колодцев и скважин у берегов Тореев, в областях распространения пластовых вод, где дебиты скважин снижаются, а время взаимодействия в системе увеличивается до 90 лет и более и воды уже достигают равновесия со слюдами (мусковит, биотит, флогопит и др.), низкотемпературными

алюмосиликатами (альбит, пренит, анальцит, хлорит и др.) и т. д. Минерализация таких вод доходит до 3 г/л, а роль ведущего аниона в формуле ионно-солевого состава делят между собой HCO_3^- , SO_4^{2-} и Cl^- (красные точки на карте (рис. 5)):

$$M_{1,7} \frac{\text{Cl}^- 33 \text{HCO}_3^- 32 \text{SO}_4^{2-} 32}{\text{Na} + 55 \text{Mg}^{2+} + 29} \text{pH}_{8,0}$$

Кроме того, не исключено смешение подземных вод с солеными озёрными посредством локальной трещиноватости. Это касается нескольких точек, которые выбиваются из выборки, например воды Cl-Na скважины у хлоридного оз. Горбунка. Весь вышеописанный процесс наглядно проиллюстрирован с помощью концептуальной модели формирования состава (рис. 6).

Вывод

Показано, что в юго-восточном Забайкалье формируются несколько различных по химическому составу типов подземных вод, которые поэтапно сменяются от $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ через $\text{HCO}_3\text{-Mg}$ к $\text{HCO}_3\text{-Na}$ по мере понижения абсолютных отметок рельефа от обрамления Торейской впадины в сторону области внутреннего стока. Точечно у озёр представлены воды с самой высокой солёностью ($\text{HCO}_3\text{-SO}_4\text{-Cl-Na}$ и др.). Такая смена объясняется с позиций эволюционного развития в системе вода–порода в зависимости от времени взаимодействия воды с породой.

В соответствии с классификацией [2] было выделено три геохимических типа вод: кремнистый, содовый и солеосодержащий, а также некоторые их специфические разновидности. Воды первого типа являются нейтральными, характеризуются минерализацией до 0,5 г/л и находятся на стадии насыщения с глинами (каолинит и монтмориллониты Ca, Mg, Na, K), а также иногда с дафнитом, сидеритом и родохрозитом. Кремнистые воды распространены в обрамлении Торейской впадины, в области активного водообмена, их показатели трития достигают самых высоких значений (12–29 ТЕ), а относительный возраст является самым молодым (до 50 лет).

Воды второго, содового, геохимического типа являются щелочными, их минерализация нередко уже выше 1 г/л, а значения трития, наоборот, самые низкие и находятся между 2 и 9 ТЕ. Содовые воды уже достигли насыщения относительно большего количества минералов, среди которых помимо глин появляется кальцит и другие карбонаты, что приводит к тому, что Na^+ начинает интенсивно аккумулироваться в водах, а концентрации Ca^{2+} и Mg^{2+} снижаются, связываясь равновесными минералами. Кроме того, эти воды достигли насыщения к флюориту, что позволило дополнительно выделить внутри группы кремнисто-карбонатный кальциево-фтористый подтип. Это объясняется увеличением

времени взаимодействия воды с горными породами до 57 лет и более, которое контролируется снижением интенсивности водообмена по мере движения вод к центру Торейской впадины и отсутствием стока.

Формирование третьего геохимического типа, солесодержащего, воды которого преимущественно отбирали из колодцев и скважин у берегов Тореев, в областях распространения пластовых вод с низкими дебитами скважин, обусловлено как еще более длительным временем взаимодействия (>90 лет), так и влиянием интенсивного испарения в регионе. Эти

воды уже достигают насыщения с низкотемпературными алюмосиликатами (альбит, хлорит и др.), тритий в них практически отсутствует, а минерализация возрастает до 3 г/л. Испарение здесь может как напрямую влиять на состав через концентрирование в неглубокозалегающих водоносных горизонтах, ускоряя тем самым процессы взаимодействия в системе вода–порода, так и через дефляцию с водосборов солёных озёр. Для уточнения первых результатов датирования подземных вод в дальнейшем планируется применение тритий/гелиевого-3 и/или уран-торий/гелиевого-3 методов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шварцев С.Л. Гидрогеохимия зоны гипергенеза. 2е изд. испр. и доп. – М.: Недра, 1998. – 367 с.
2. Система вода–порода в условиях зоны гипергенеза. Т. 2. / С.Л. Шварцев, Б.Н. Рыженко, В.А. Алексеев, Е.М. Дутова, И.А. Кондратьева // Геологическая эволюция и самоорганизация системы вода–порода: в 5 т. / под ред. Б.Н. Рыженко. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2007. – 389 с.
3. Колубаева Ю.В., Шварцев С.Л., Копылова Ю.Г. Геохимия вод северной части Колывань-Томской складчатой зоны // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. – 2010. – № 2. – С. 50–58.
4. Чечель Л.П., Замана Л.В. Геохимические типы вод хвостохранилищ свинцово-цинковых месторождений Восточного Забайкалья // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330. – № 4. – С. 17–25. DOI: 10.18799/24131830/2019/4/189
5. Роль системы вода–порода в процессах формирования состава радоновых вод Тулинского месторождения (г. Новосибирск) / Д.А. Новиков, А.Н. Пыряев, А.А. Максимова, В.П. Сухоруков, А.С. Деркачев, А.Ф. Сухорукова, Ф.Ф. Дульцев, А.В. Черных, А.А. Хвощевская, Н.А. Медешова // Геология и геофизика. – 2024. – Т. 65. – № 12. – С. 1772–1790. DOI: 10.15372/GiG2024117
6. Распределение химических элементов в системе вода–порода (на примере железнодорожного ключа в долине реки Ини) / Д.А. Новиков, Л.Г. Вакуленко, А.А. Максимова, О.Д. Николенко, А.С. Деркачев, Я.В. Фомина (Садыкова), А.А. Хвощевская // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 2. – С. 201–214. DOI: 10.18799/24131830/2025/2/4759
7. Гусева Н.В., Копылова Ю.Г., Хвощевская А.А. Геохимические типы природных вод на междуречье Ензоряхи и Юньяхи (восточный склон Полярного Урала) // Водные ресурсы. – 2013. – Т. 40. – № 4. – С. 386–395. DOI: 10.7868/S0321059613040056
8. Наймушина О.С. Геохимическая эволюция природных вод нижней части бассейна реки Томи: дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – Томск, 2014. – 169 с.
9. Lepokurova O.E. Sodium-bicarbonate groundwaters in southeastern West Siberia, Russia: Compositions, types, and formation conditions // Applied Geochemistry. – 2020. – Vol. 116. – article no. 104579. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2020.104579
10. Дребот В.В. Формирование химического состава подземных вод в районе Торейских озёр (Забайкальский край): дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – Томск, 2023. – 150 с.
11. Лепокурова О.Е., Дребот В.В. Изотопный состав ($\delta^{18}\text{O}$, δD , $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{34}\text{S}$) подземных вод территории Торейских озёр (Восточное Забайкалье) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 9. – С. 20–29. DOI: 10.18799/24131830/2021/9/3350
12. Борзенко С.В., Замана Л.В., Посохов В.Ф. Изотопный состав, природа и основные механизмы формирования разных типов и подтипов солёных озёр Забайкалья // Геология и геофизика. – 2022. – Т. 63. – № 6. – С. 851–874. DOI: 10.15372/GiG2021110
13. Дребот В.В., Лепокурова О.Е. Равновесно-неравновесное состояние природных вод территории Торейских озёр (Восточное Забайкалье) с ведущими минералами вмещающих пород // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333. – № 9. – С. 99–112. DOI: 10.18799/24131830/2022/9/3768
14. Borzenko S.V., Drebot V.V., Fedorov I.A. Main formation conditions of soda-type groundwater: A case study from south-eastern Transbaikalia region (Russia) // Applied Geochemistry. – 2020. – Vol. 123. – article number 104763. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2020.104763
15. Шварцев С.Л. Содовые воды как зеркало противоречий в современной гидрогеохимии // Фундаментальные проблемы современной гидрогеохимии: Труды Международной науч. конф., посвящ. 75-летию юбилею гидрогеохимии. – Томск: Изд-во НТЛ, 2004. – С. 70–75.
16. Borzenko S.V. The main formation processes for different types of salt lakes: Evidence from isotopic composition with case studies of lakes in Transbaikalia, Russia // Science of the Total Environment. – 2021. – Vol. 782. – article number 146782. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.146782
17. Ферронский В.И., Поляков В.А. Изотопия гидросферы Земли. – М.: Научный Мир, 2009. – 632 с.
18. Stotler R. Geochemistry: isotope hydrogeology // Encyclopedia of Geology. – Amsterdam: Elsevier, 2021. – P. 426–441. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102908-4.00012-6>
19. Nitrate trend reversal in Dutch dual-permeability chalk springs, evaluated by tritium-based groundwater travel time distributions / H.P. Broers, M.E. van Vliet, T. Kivits, R. Vernes, T. Brussée, J. Sültenfuß, D. Fraters // Science of the Total Environment. – 2024. – Vol. 951. – article number 175250. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.175250

20. Estimation of groundwater recharge from precipitation by using tritium and chloride concentrations in the Chinese loess unsaturated zone in Inner Mongolia, China / J. Liu, Z. Chen, Z. Nie, Y. Tian // *Hydrogeology Journal*. – 2024. – Vol. 32. – P. 1511–1520. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10040-024-02798-8>
21. Quantifying recharge mechanisms in low-hilly areas of a loess region: Implications for the quantity and quality of groundwater / H. Li, W. Xiang, B. Si, M. Min, C. Miao, J. Jin // *Journal of Hydrology*. – 2024. – Vol. 643. – article number 131982. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2024.131982
22. Tritium across the hydrologic systems of southern Ontario, Canada: implications for groundwater age dating in the Great Lakes Basin / E.H. Priebe, S.M. Hamilton, A. Lemieux, D.J. Rowan, I.D. Clark // *Hydrogeology Journal*. – 2023. – Vol. 31. – P. 641–659. DOI: 10.1007/s10040-023-02626-5
23. Analysis of isoscapes (δD , $\delta^{18}O$ and tritium) in groundwater in the semiarid northeast region of Mexico / O.J. Ibarra-Alejos, R. Ventura-Houle, J.F. Morales, B.A. Macías, L. Heyer // *Hydrogeology Journal*. – 2024. – Vol. 32. – P. 1521–1535. DOI: 10.1007/s10040-024-02802-1
24. Mamun A. Groundwater renewal time by environmental tritium isotopes as a tracer for sustainable water resource management // *Discover Water*. – 2024. – Vol. 4. – article number 84. DOI: 10.1007/s43832-024-00135-4
25. Identification of salinity sources in groundwater at Golgohar Mine using self-organizing maps (SOM) and correlation analysis: a hydrogeochemical and isotopic approach, south-central Iran / F. Jafari, H.R. Nassery, F. Alijani, S. Maknooni Gilani // *Environmental Geochemistry and Health*. – 2025. – Vol. 47. – article number 105. DOI: 10.1007/s10653-025-02414-y
26. Banerjee S., Sikdar P.K., Kumar S. Hydrochemical systematics and isotope ($\delta^{18}O$, δD and $3H$) variations of aquifer system of southern Bengal Basin: implications for groundwater pollution // *Environmental Science and Pollution Research*. – 2024. – Vol. 31. – № 16. – P. 23858–23875. DOI: 10.1007/s11356-024-32692-5
27. Origin and evolution of groundwater in the Gohar-Zamin Mine Area using hydrogeochemical and isotopic analyses / A. Saberinasr, N. Kalantari, H. Ghelichpour, M. Morsali // *Mine Water and the Environment*. – 2025. – Vol. 44. – P. 30–54. DOI: 10.1007/s10230-025-01032-5
28. Yoon Y.Y., Ko K.S., Lee J.M. Tritium and $35S$ activity variation in precipitation in Korea and its application to groundwater age determination // *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. – 2023. – Vol. 332. – P. 1917–1921. DOI: 10.1007/s10967-023-08888-3
29. Groundwater vulnerability to pollution in Africa's Sahel region / J. Podgorski, O. Kracht, L. Araguas-Araguas, S. Terzer-Wassmuth, J. Miller, R. Straub, R. Kipfer, M. Berg // *Nature Sustainability*. – 2024. – Vol. 7. – P. 558–567. DOI: 10.1038/s41893-024-01319-5
30. Hydrogeochemical and isotopic evolution of groundwater in shallow and deep aquifers of the Kabul Plain, Afghanistan / A. Zaryab, A. Farahmand, H.R. Nassery, F. Alijani, S. Ali, M.Z. Jamal // *Environmental Geochemistry and Health*. – 2023. – Vol. 45. – P. 8503–8522. DOI: 10.1007/s10653-023-01734-1
31. Лебедева Л.С., Шамов В.В., Горячев В.В. Тритий в атмосферных, поверхностных и подземных водах Восточной Сибири // *Подземная гидросфера: материалы Всероссийского совещания по подземным водам Востока России: XXIV Совещание по подземным водам востока Сибири и Дальнего Востока с международным участием*. – Екатеринбург: Институт горного дела ИГД УрО РАН, 2024. – С. 337–342.
32. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 18. Дальний Восток. Вып. 1. Верхний и средний Амур / под ред. А.П. Муранова. – Л.: Гидрометеиздат, 1966. – 800 с.
33. Isotopic variation of precipitation over eastern Mongolia and its implication for the atmospheric water cycle / T. Yamanaka, M. Tsujimura, D. Oyunbaatar, G. Davaa // *Journal of Hydrology*. – 2007. – Vol. 333. – P. 21–34. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2006.07.022
34. Обязов В.А., Кирилук В.Е., Кирилук А.В. Торейские озера как индикатор многолетних изменений увлажненности Юго-восточного Забайкалья и Северо-восточной Монголии // *Гидросфера. Опасные процессы и явления*. – 2021. – Т. 3. – С. 204–232. DOI: <https://doi.org/10.34753/HS.2021.3.3.204>
35. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба. Издание второе. Серия Даурская. Лист М-50-XIV (Ниж. Цасучей), XX (Соловьевск). Масштаб 1:200000: объяснительная записка / под ред. Е.В. Нечпаева. – М.: Московский филиал ФГБУ «ВСЕГЕИ», 2019. – 97 с.
36. Степанов В.М. Гидрогеологические структуры Забайкалья. – М.: Недра, 1980. – 176 с.
37. Туваанжав Г., Халзанхуу Ж. Химический состав атмосферных осадков в окрестностях г. Улаанбаатара // *Бюллетень Восточно-Сибирского научного центра Сибирского отделения Российской академии медицинских наук*. – 2005. – № 8 (46). – С. 76–79.
38. Экосистемы содовых озер Северо-Востока Центральной Азии в поисках ответов на вызовы времени / С.В. Борзенко, Б.Б. Базарова, А.П. Куклин, Л.В. Замана, Е.Ю. Афонина, Н.А. Ташлыкова, Г.Ц. Цыбекмитова, П.В. Матафонов, И.А. Федоров // *Байкал – ворота в Азию: Материалы Международн. научно-практ. конф.* – Улан-Удэ: Бурятский научный центр СО РАН, 2021. – С. 59–62. DOI: <https://doi.org/10.31554/978-5-7925-0605-3-2021-59-62>

Информация об авторах

Валерия Витальевна Дребот, 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, DrebotVV@ipgg.sbras.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0458-2864>

Олеся Евгеньевна Лепокурова, доктор геолого-минералогических наук, директор и ведущий научный сотрудник Томского филиала Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, Россия, 634055, г. Томск, пр. Академический, 4; профессор отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, <https://orcid.org/0000-0003-0252-197>

Светлана Владимировна Борзенко, доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник, и. о. заведующего лабораторией Института природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН, Россия, 672014, г. Чита, ул. Недорезова, 16а, <https://orcid.org/0000-0003-3929-642>

Поступила в редакцию: 23.04.2025

Поступила после рецензирования: 07.05.2025

Принята к публикации: 18.06.2025

REFERENCES

1. Shvartsev S.L. *Hydrogeochemistry of the hypergenesis zone*. 2nd ed. Moscow, Nedra Publ., 1998. 367 p. (In Russ.)
2. Shvartsev S.L., Ryzhenko B.N., Alekseev V.A., Dutova E.M., Kondratieva I.A. Water–rock system under conditions of hypergenesis zone. Vol. 2. *Geological evolution and self-organization of the water–rock system*. Ed. by B.N. Ryzhenko. Novosibirsk, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences Publ. House, 2007. 389 p. (In Russ.)
3. Kolubaeva Yu.V., Shvartsev S.L., Kopylova Yu.G. Water geochemistry of the North of Kolyvan-Tomsk folded zone. *Proceedings of higher educational establishments. Geology and exploration*, 2010, no. 2, pp. 50–58. (In Russ.)
4. Chechel L.P., Zamana L.V. Geochemical types of waters of lead-zinc deposits tailings in the Eastern Transbaikalia. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 4, pp. 17–25. (In Russ.) DOI: 10.18799/24131830/2019/4/189
5. Novikov D.A., Pyryaev A.N., Maksimova A.A., Sukhorukov V.P., Derkachev A.S., Sukhorukova A.F., Dultsev F.F., Chernykh A.V., Khvashevskaya A.A., Medeshova N.A. Role of the water–rock system in the formation of the composition of radon water of the Tulinskoe field (Novosibirsk). *Geology and Geophysics*, 2024, vol. 65, no. 12, pp. 1772–1790. (In Russ.) DOI: 10.15372/GiG2024117
6. Novikov D.A., Vakulenko L.G., Maksimova A.A., Nikolenko O.D., Derkachev A.S., Fomina (Sadykova) Ya.V., Khvashevskaya A.A. Distribution of chemical elements in the water–rock system (based on the example of a Zheleznodorozhny spring in the valley of the Inya river). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 2, pp. 201–214. (In Russ.) DOI: 10.18799/24131830/2025/2/4759
7. Guseva N.V., Kopylova Yu.G., Khvashevskaya A.A. Geochemical types of natural waters in the interfluvium of the Enzoryakhi and the Yunyakhi (Eastern slope of the Polar Urals). *Water Resources*, 2013, vol. 40, no. 4, pp. 417–425. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0097807813040052>
8. Naimushina O.S. *Geochemical evolution of natural waters in the lower part of the Tom River basin*. Cand. Dis. Tomsk, 2014. 169 p. (In Russ.)
9. Lepokurova O.E. Sodium-bicarbonate groundwaters in southeastern West Siberia, Russia: compositions, types, and formation conditions. *Applied Geochemistry*, 2020, vol. 116, article number 104579. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2020.104579
10. Drebot V.V. *Chemical composition formation of groundwater in the area of the Torey Lakes (Transbaikalia)*. Cand. Dis. Tomsk, 2023. 150 p. (In Russ.)
11. Lepokurova O.E., Drebot V.V. Isotopic composition ($\delta^{18}\text{O}$, δd , $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{34}\text{S}$) of groundwaters in the area of toreya lakes (eastern Transbaikalia region). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 9, pp. 20–29. (In Russ.) DOI: 10.18799/24131830/2021/9/3350
12. Borzenko S.V., Zamana L.V., Posokhov V.F. The isotope composition, nature, and main mechanisms of formation of different types and subtypes of salt lakes in Transbaikalia. *Russian Geology and Geophysics*, 2022, vol. 63, no. 6, pp. 706–725. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.2113/RGG20214272> 10.2113
13. Drebot V.V., Lepokurova O.E. Equilibrium–Nonequilibrium state of natural waters in the area of the Torey Lakes (Eastern Transbaikalia) with leading minerals of host rocks. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, no. 9, pp. 99–112. (In Russ.) DOI: 10.18799/24131830/2022/9/3768
14. Borzenko S.V., Drebot V.V., Fedorov I.A. Main formation conditions of soda-type groundwater: A case study from south-eastern Transbaikalia region (Russia). *Applied Geochemistry*, 2020, vol. 123, article number 104763. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2020.104763
15. Shvartsev S.L. Soda waters as a mirror of contradictions in modern hydrogeochemistry. Fundamental problems of modern hydrogeochemistry. *Fundamental Problems of Modern Hydrogeochemistry: Proceedings of the International Scientific Conf., dedicated to the 75th Anniversary of Hydrogeochemistry*. Tomsk, NTL Publ. House, 2004. pp. 70–75. (In Russ.)
16. Borzenko S.V. The main formation processes for different types of salt lakes: Evidence from isotopic composition with case studies of lakes in Transbaikalia, Russia. *Science of the Total Environment*, 2021, vol. 782, article number. 146782. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.146782
17. Ferronsky V.I., Polyakov V.A. *Isotopy of the Earth's hydrosphere*. Moscow, Nauchny Mir Publ., 2009. 632 p. (In Russ.)
18. Stotler R. Geohydrology: isotope hydrogeology. *Encyclopedia of Geology*. Amsterdam, Elsevier, 2021. pp. 426–441. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102908-4.00012-6> 10.1016
19. Broers H.P., Van Vliet M.E., Kivits T., Vernes R., Brussée T., Sültenfuß J., Fraters D. Nitrate trend reversal in Dutch dual-permeability chalk springs, evaluated by tritium-based groundwater travel time distributions. *Science of the Total Environment*, 2024, vol. 951, article number. 175250. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.175250
20. Liu J., Chen Z., Nie Z., Tian Y. Estimation of groundwater recharge from precipitation by using tritium and chloride concentrations in the Chinese loess unsaturated zone in Inner Mongolia, China. *Hydrogeology Journal*, 2024, vol. 32, pp. 1511–1520. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10040-024-02798-8> 10.1007
21. Li H., Xiang W., Si B., Min M., Miao C., Jin J. Quantifying recharge mechanisms in low-hilly areas of a loess region: Implications for the quantity and quality of groundwater. *Journal of Hydrology*, 2024, vol. 643, article number 131982. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2024.131982

22. Priebe E.H., Hamilton S.M., Lemieux A., Rowan D.J., Clark I.D. Tritium across the hydrologic systems of southern Ontario, Canada: implications for groundwater age dating in the Great Lakes Basin. *Hydrogeology Journal*, 2023, vol. 31, pp. 641–659. DOI: 10.1007/s10040-023-02626-5
23. Ibarra-Alejos O.J., Ventura-Houle R., Morales J.F., Macías B.A., Heyer L. Analysis of isoscapes (δD , $\delta^{18}O$ and tritium) in groundwater in the semiarid northeast region of Mexico. *Hydrogeology Journal*, 2024, vol. 32, pp. 1521–1535. DOI: 10.1007/s10040-024-02802-1
24. Mamun A. Groundwater renewal time by environmental tritium isotopes as a tracer for sustainable water resource management. *Discover Water*, 2024, vol. 4, article number 84. DOI: 10.1007/s43832-024-00135-4 EDN: EXDXNE
25. Jafari F., Nassery H.R., Alijani F., Maknooni S Gilani Identification of salinity sources in groundwater at Golgohar Mine using self-organizing maps (SOM) and correlation analysis: a hydrogeochemical and isotopic approach, south-central Iran. *Environmental Geochemistry and Health*, 2025, vol. 47, article number 105. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10653-025-02414-y>"10.1007
26. Banerjee S., Sikdar P.K., Kumar S. Hydrochemical systematics and isotope ($\delta^{18}O$, δD and $3H$) variations of aquifer system of southern Bengal Basin: implications for groundwater pollution. *Environmental Science and Pollution Research*, 2024, vol. 31, no. 16, pp. 23858–23875. DOI: 10.1007/s11356-024-32692-5
27. Saberinasr A., Kalantari N., Ghelichpour H., Morsali M. Origin and Evolution of Groundwater in the Gohar-Zamin Mine Area Using Hydrogeochemical and Isotopic Analyses. *Mine Water and the Environment*, 2025, vol. 44, pp. 30–54. DOI: 10.1007/s10230-025-01032-5
28. Yoon Y.Y., Ko K.S., Lee J.M. Tritium and ^{35}S activity variation in precipitation in Korea and its application to groundwater age determination. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2023, vol. 332, pp. 1917–1921. DOI: 10.1007/s10967-023-08888-3 EDN: OAJWZK
29. Podgorski J., Kracht O., Araguas-Araguas L., Terzer-Wassmuth S., Miller J., Straub R., Kipfer R., Berg M. Groundwater vulnerability to pollution in Africa's Sahel region. *Nature Sustainability*, 2024, vol. 7, pp. 558–567. DOI: 10.1038/s41893-024-01319-5
30. Zaryab A., Farahmand A., Nassery H.R., Alijani F., Ali S., Jamal M.Z. Hydrogeochemical and isotopic evolution of groundwater in shallow and deep aquifers of the Kabul Plain, Afghanistan. *Environmental Geochemistry and Health*, 2023, vol. 45, pp. 8503–8522. DOI: 10.1007/s10653-023-01734-1
31. Lebedeva L.S., Shamov V.V., Goryachev V.V. Tritium in atmospheric, surface, and groundwater of Eastern Siberia. *Underground Hydrosphere. Materials of the XXIV All-Russian Conference on Groundwater of the East of Russia with International Participation*. Yekaterinburg, Institute of Mining of Ural Branch of RAS, 2024. pp. 337–342. (In Russ.)
32. *Resources of surface waters of the USSR. Vol. 18. Far East. Iss. 1. Upper and Middle Amur*. Ed. by A.P. Muranov. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1966. 800 p. (In Russ.)
33. Yamanaka T., Tsujimura M., Oyunbaatar D., Davaa G. Isotopic variation of precipitation over eastern Mongolia and its implication for the atmospheric water cycle. *Journal of Hydrology*, 2007, vol. 333, pp. 21–34. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2006.07.022
34. Obizov V.A., Kirilyuk V.E., Kirilyuk A.V. Torey lakes as an indicator of moisture long-term changes in southeastern Transbaikalia and Northeastern Mongolia. *Hydrosphere. Hazardous Processes and Phenomena*, 2021, vol. 3, pp. 204–232. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.34753/HS.2021.3.3.204>"10.34753
35. *State Geological Map of the Russian Federation at a scale of 1:200000. 2nd ed. Daurian Series. Sheet M-50-XIV (Nizhny Tsasuchay), XX (Solovyovsk): explanatory note*. Ed. by E.V. Nechaev. Moscow, Moscow Branch of FSBI «VSEGEI» Publ., 2019. 97 p. (In Russ.)
36. Stepanov V.M. *Hydrogeological structures of Transbaikalia*. Moscow, Nedra Publ., 1980. 176 p. (In Russ.)
37. Tuvanjav G., Khalzanhoo Zh. Chemical composition of air precipitation in environs of Ulaanbaatar. *Bulletin of the East Siberian Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Medical Sciences*, 2005, no. 8 (46), pp. 76–79. (In Russ.)
38. Borzenko S.V., Bazarova B.B., Kuklin A.P., Zamana L.V., Afonina E.Yu., Tashlykova N.A., Tsybekmitova G.Ts., Matafonov P.V., Fedorov I.A. Ecosystems of soda lakes in the North-East of Central Asia in search of answers to the challenges of the time. *Baikal – Gateway to Asia. Materials of the International Scientific and Practical Conference*. Ulan-Ude, Buryat Scientific Center SB RAS Publ., 2021. pp. 59–62. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.31554/978-5-7925-0605-3-2021-59-62>"10.31554

Information about the authors

Valeriia V. Drebot, Cand. Sc., Researcher, Tomsk Branch of Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 4, Academicheskoy avenue, Tomsk, 634055, Russian Federation, DrebotVV@ipgg.sbras.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0458-2864>

Olesya E. Lepokurova, Dr. Sc., Head of Laboratory, Tomsk Branch of Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 4, Academicheskoy avenue, Tomsk, 634055, Russian Federation; Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0003-0252-197>

Svetlana V. Borzenko, Dr. Sc., Chief Researcher, Acting Head of the Laboratory of the Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology SB RAS, 16a, Nedorezov street, Chita, 672014, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0003-3929-642>

Received: 23.04.2025

Revised: 07.05.2025

Accepted: 18.06.2025

УДК 561:577.21
DOI: 10.18799/24131830/2025/7/5103
Шифр специальности ВАК: 1.6.10
Научная статья

Применение ИК-спектроскопии диффузного отражения в молекулярной палеонтологии

В.П. Иванов[✉], И.В. Рычкова, М.Г. Пахтаева

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск

[✉]ivp2005@mail.ru

Аннотация. Актуальность исследования обусловлена необходимостью выявления новых диагностических признаков в структурах родственных ископаемых и современных растений. Молекулярная палеонтология как самостоятельное направление хорошо себя зарекомендовало в части изучения ископаемых представителей растительного и животного мира. **Цель.** Изучение фитолейм и гербариев проводилось по ИК-спектрам диффузного отражения и по результатам их обработки ИТ-программой ASPECT, которая является частью методологии структурно-кластерного анализа углефицированных веществ. Такой подход позволяет получать результаты количества структурообразующих кластеров, состоящих из элементов C, N, H, O, и количественный состав функциональных групп C-C, C-N, C-H, C-O, N-H, N-O в образце вещества. **Объекты.** Образцы современных и средне-позднеюрских мхов, хвощей, папоротников и гинкгоопсид. **Методы.** Морфологический, эпидермально-кутикулярный, ИК-спектрометрический. **Результаты и выводы.** В молекулярной структуре мхов, хвощей, папоротников и гинкгоопсид за счёт связей C-N и C-O происходит рекомбинация в связи C-H, N-H, N-O. Существуют структурные отличия листьев от стебля у хвоща и папоротника, но особенно хвощовые и папоротники отличаются большим количеством функциональных структурных единиц vCCN и vOCO в хвощах и большим количеством vCC и δ NH в папоротниках, что служит диагностическим критерием в молекулярной палеоботанике. Сравнительный анализ угля и фитолеймы хвоща *Equisetites* sp. из скважин на площади Снежная в Томской области показал, что структура углефицированного вещества захороненных хвощей в нижележащих осадках по количеству связей C-C, C-N, C-O, N-H не отличается от структуры углей, концентрированных выше в виде тонкого прослоя. Это может свидетельствовать об образовании угля из хвощовых торфяных осадков, где признаком различия может служить количество СН-связи, которых в угле меньше.

Ключевые слова: молекулярная палеонтология, фитолейма, гербарий, ИК-спектрометрия, юрские растения

Благодарности: Исследование поддержано грантом РНФ (проект № 23-27-00013).

Для цитирования: Иванов В.П., Рычкова И.В., Пахтаева М.Г. Применение ИК-спектроскопии диффузного отражения в молекулярной палеонтологии // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 7. – С. 238–246. DOI: 10.18799/24131830/2025/7/5103

UDC 561:577.21
DOI: 10.18799/24131830/2025/7/5103
Scientific paper

Diffuse reflectance IR spectroscopy in molecular paleontology

V.P. Ivanov[✉], I.V. Rychkova, M.G. Pakhtaeva

National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

[✉]ivp2005@mail.ru

Abstract. Relevance. The need to identify new diagnostic features in the structures of related fossils and modern plants. Molecular paleontology as an independent direction has proved itself well in the part of studying fossil representatives of plant and animal world. **Aim.** The study of phytolaims and herbariums by IR spectra of diffuse reflectance after their processing by the

ASPECT programme complex is a part of the structural cluster analysis of carbonized substances methodology. It allows obtaining the results of structure-group analysis in the form of calculation of the number of functional structural units – structure-forming clusters from elements C, N, H, O and their quantity in the form of elemental composition C-C, C-N, C-H, C-O, N-H, N-O. **Objects.** Samples of the recent and Middle-Late Jurassic mosses, horsetails, ferns and ginkgoopsids. **Methods.** Morphological, epidermal-cuticular, infrared spectrometric. **Results and conclusions.** In the molecular structure of mosses, horsetails, ferns and ginkgoopsids, due to the C-N and C-O bonds, recombination occurs in the C-H, N-H, N-O bonds. There are structural differences between the leaves and the stem of horsetails and ferns, but horsetails and ferns are especially distinguished by a large number of functional structural units vCCN and vOCO in horsetails and a large number of vCC and δ NH in ferns, which serve as a diagnostic criterion in molecular paleobotany. Comparative analysis of coal and phytolite of horsetail *Equisetites* sp. from wells in the Snezhnaya area in the Tomsk region showed that the structure of the carbonized matter of buried horsetails in the underlying sediments does not differ in the number of C-C, C-N, C-O, N-H bonds from the structure of coals concentrated above in the form of a thin layer. This may indicate the formation of coal from horsetail peat sediments, where the difference may be indicated by the number of CH bonds, which are smaller in coal.

Keywords: molecular paleontology, phytolite, herbarium, IR spectrometry, Jurassic plants

Acknowledgements: The research was supported by the Russian Science Foundation grant no. 23-27-00013.

For citation: Ivanov V.P., Rychkova I.V., Pakhtaeva M.G. Diffuse reflectance IR spectroscopy in molecular paleontology. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 7, pp. 238–246. DOI: 10.18799/24131830/2025/7/5103

Введение

На современном этапе развития науки молекулярная палеонтология представляет собой самостоятельное направление, изучающее молекулярные следы жизнедеятельности организмов, по структуре которых можно было бы судить об их биохимическом происхождении и проследить эволюцию живого вещества [1]. Из ископаемых тканей только биомолекулы являются пока наиболее информативными при идентификации организма, т. к. в результате диагенеза на фоссилизацию влияет очень много факторов [2]. Молекулы, сохранённые в окаменелостях, могут быть использованы как доказательства эволюции организмов на молекулярном уровне. Молекулярные соединения в живом веществе – белки, жиры, углеводы, остаются практически неприкосновенными по своему строению. Такое наследование биохимической информации обусловлено сохранением углеродного скелета в биомолекулах [3].

Автор обзорной статьи [4] уточняет, что молекулярная палеонтология направлена на изучение древних сложных биомолекул окаменелостей, которые могут предоставить важную информацию для понимания эволюции организмов и процесса фоссилизации на молекулярном уровне и облегчить распознавание сохранившихся биомаркеров для идентификации жизни. Для этого в изучении, например, окаменелостей нептичьих динозавров [5] используются неразрушающие методы и процедуры, ограниченные поверхностью образца, в частности, световая и электронная микроскопия, инфракрасная (ИК) и рамановская спектроскопия. Кроме этого, используют более инвазивные подходы, включая жидкостную хроматографию в сочетании с tandemной масс-спектрометрией (ЖХ-МС/МС), времяпролётную вторичную ионную масс-спектрометрию и иммунологические методы [6].

Для определения редкоземельных элементов и проведения молекулярного анализа часто используются мягкие ткани [7], а в качестве биомаркеров – молекулы на основе порфирина, проливающие свет на эволюцию жизни [8]. Но, например, для изучения эукариот возрастом около 1 млрд лет используются молекулярные окаменелости в битумах и керогенах [9]. Поэтому в молекулярной палеонтологии важным обстоятельством является сохранность образца в процессе проведения анализа [10]. Эти авторы установили, что фрагменты белка чаще встречались в осадочных отложениях (33,3 %), а древние последовательности ДНК чаще встречались в осадочных средах. Поэтому изменение белка, в частности коллагена, можно наблюдать в процессе измерения методом ИК-Фурье отражения [11].

С другой стороны, в накоплении органического углерода решающую роль играет поступление растительной массы остатков от высших растений [12], что в целом приводит к образованию слоёв углей, также изучаемых с помощью этого метода.

Таким образом, данный метод является эффективным в изучении механизма накопления органического вещества, т. к. он позволяет по спектральным характеристикам проводить идентификацию полос ИК-спектра и формулировать интерпретацию, используя значения интенсивности информативных полос в виде отношения между собой.

Для выявления диагностических признаков у родственных ископаемых (фитолейм) и современных (гербариев) растений были использованы микроскопия и методология СКАУФВ (структурно-кластерный анализ углефицированных веществ) на основе ИК-спектроскопии [13]. Цель представленных исследований заключалась в проведении сопоставления микроструктуры образцов и их атомарно-молекулярной организации в виде связей химических

элементов C, N, H, O, применяя результаты структурно-группового анализа (СГА) в виде количества связей этих элементов (структурно-элементный анализ) и баланса функциональных структурных единиц (ФСЕ) – структурообразующих кластеров, используя структурно-кластерный анализ (СКА).

Материал и методы

В качестве объектов исследования были выбраны фитолеймы – это фоссилизированные (мумифицированные и обугленные) остатки растений средне-позднеюрского возраста из наунакской свиты скважин Западной Сибири (Томская область), а также гербарии – мумифицированные образцы современных мхов, хвощей, папоротников и гинкгоопсид, собранные преимущественно в окрестностях города Томска. Лишь современные гинкго привезены из Республики Корея (табл. 1). Все образцы хранятся в Томском политехническом университете.

В исследованиях эволюции растительного мира были применены подходы молекулярной палеонтологии, изучение проводилось по ИК-спектрам диффузного отражения с последующей обработкой программным комплексом (ПК ASPECT) для идентификации молекулярного строения углефицированных и углеродистых веществ сингенетических каустобиолитов (СКБЛ) и мумифицированных органических веществ.

Этой публикацией авторы обращают внимание на новые и перспективные возможности проведения исследований в таком направлении, как молекулярная палеоботаника, применяя разработанную в ТПУ методологию СКАУФВ. Проведённые ранее исследования структуры фитолейм хвощей, папоротников, гинкгоопсид, хвойных ИК-спектрометрическим методом уже показали эффективность использования спектров диффузного отражения для изучения молекулярной структуры этих веществ [15].

В представленной статье для выяснения особенностей строения растений разной степени фоссилизации, увязки их между собой по морфологии были использованы ФСЕ νOCO , νNH , νCH , νCCN , νCC , δNH , δCH , δCOC , отражающие внутримолекулярные и надмолекулярные связи. Впервые для этой цели был использован структурно-элементный анализ (СЭА) этих химических элементов в виде количества связей C-C, C-H, C-O, C-N, N-H, N-O.

Последующее сопоставление результатов молекулярной палеонтологии, морфологического и эпидермально-кутикулярного анализа остатков мхов, хвощей, папоротников и гинкгоопсид (порядки гинговых и чекановские) средне-позднеюрского возраста и современных мхов, хвощей, папоротников и гинкгоопсид (только порядок гинговых, поскольку порядок чекановские вымершие растения) позволило выявить признаки и закономерности эволюции растительного мира, идентифицировать структурные особенности исследуемых веществ и провести интерпретацию их происхождения.

Результаты и обсуждения

Полученные сведения о палеоботанических исследованиях свидетельствует о том, что состав древних растений качественно не отличался от состава современных растений [16]. Однако количественный СЭА характеризует влияние процесса фоссилизации на число и вид структурообразующих связей.

Среди мхов изучались образцы рода *Hepaticites* sp. средне-позднеюрского возраста из скважин площади Снежная Томской области и современные мхи рода *Sphagnum* sp. из окрестностей города Томска (рис. 1, а, б). Из графика видно, что все имеющиеся связи изменяются. Количество связей C-N и C-O идёт в сторону увеличения в процентном соотношении от древних к современным (рис. 1, в). Количество остальных связей от древних к современным изменяется в сторону уменьшения.

Среди хвощей в исследованиях рассматривались представители рода *Equisetites* sp. средне-позднеюрского возраста из скважин площадей Майская и Снежная Томской области и современные хвощи рода *Equisetum* sp. из окрестностей города Томска (рис. 2, а, б). Ткань хвощовых растений при фоссилизации в виде остатка значительно преобразуется. В частности, на примере юрских и современных экземпляров видно, что структура углефицированного вещества хвощей формируется за счёт рекомбинации связей C-N и C-O, т. е. за счёт этих связей частично образуются каркасные соединения (C-C), а в основном появляются новые углеводородные связи (C-H). В количественном отношении связи N-H, N-O в образцах фитолейм также преобладают значительно в сравнении аналогичными связями в образце гербария (рис. 2, в).

Таблица 1. Классификация изученных растений [14]

Table 1. Classification of the studied plants [14]

Отдел/Division	Класс/Class	Порядок/Order	Род/Genus
Bryophyta	Bryopsida	–	<i>Hepaticites</i> MZ; <i>Sphagnum</i> KZ
Equisetophyta	Equisetopsida	–	<i>Equisetites</i> MZ; <i>Equisetum</i> KZ
Polypodiophyta	Polypodiopsida	–	<i>Coniopteris</i> MZ; <i>Pteridium</i> KZ
Pinophyta	Ginkgoopsida	Ginkgoales MZ-KZ	<i>Ginkgo</i> MZ-KZ
		Czekanowskiales MZ	<i>Czekanowskia</i> MZ; <i>Phoenicopsis</i> MZ

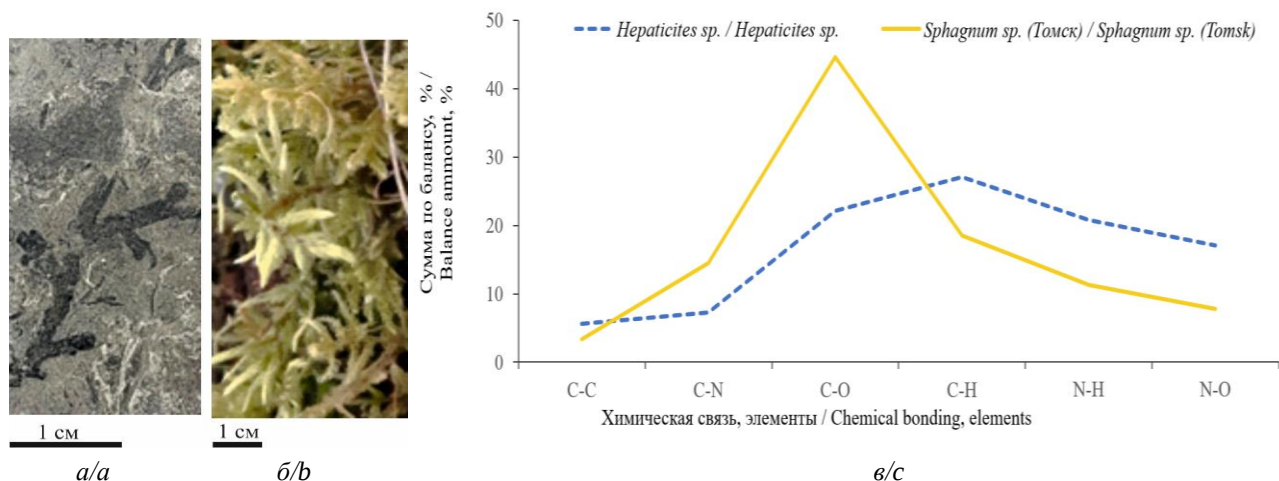


Рис. 1. а) *Hepaticites sp.* (пл. Снежная, 626, гл. 2474,59 м, обр. 72/940); б) *Sphagnum sp.* (г. Томск, обр. 72/927); коллекция ТПУ; в) график соотношения структур по балансу ФСЕ на основе группового анализа растений по видам связи элементов C, N, O, H между собой

Fig. 1. а) *Hepaticites sp.* (area Snezhnaya, 626, depth 2474.59 m, sample 72/940); б) *Sphagnum sp.* (Tomsk city, sample 72/927); TPU collection; в) graph of the relationship of structures according to the balance of functional structural units (FSU) based on group analysis of plants according to the types of connections between elements C, N, O, H

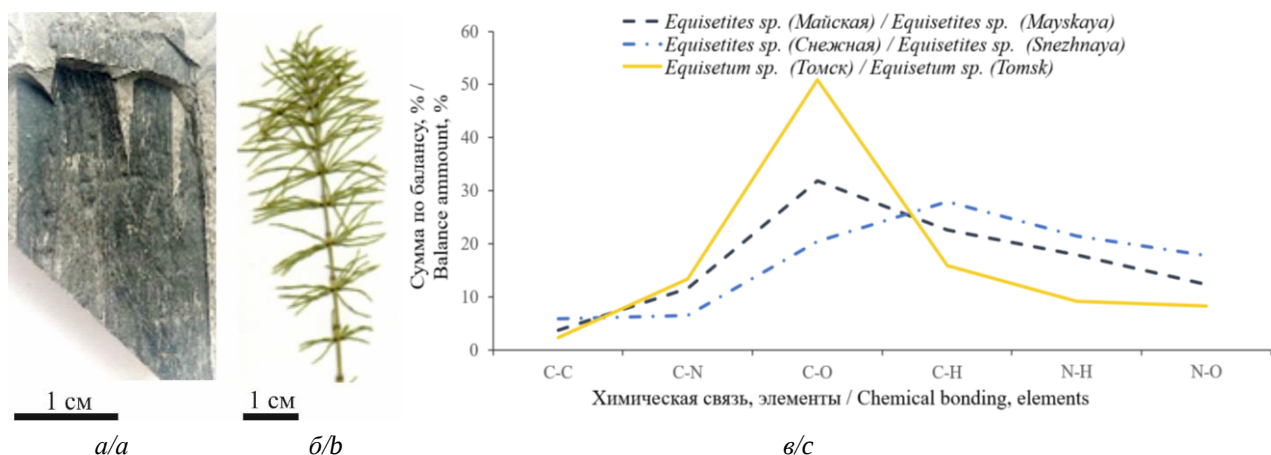


Рис. 2. а) *Equisetites sp.* (пл. Снежная, 135, гл. 2491,3 м, обр. 72/226); б) *Equisetum sp.* (г. Томск, обр. 72/924); коллекция ТПУ; в) график соотношения структур по балансу ФСЕ на основе группового анализа растений по видам связи элементов C, N, O, H между собой

Fig. 2. а) *Equisetites sp.* (area Snezhnaya, 135, depth 2491.3 m, sample 72/226); б) *Equisetum sp.* (Tomsk city, sample 72/924); TPU collection; в) graph of the relationship of structures according to FSU balance based on group analysis of plants according to the types of connections between elements C, N, O, H

Проведённый структурно-кластерный анализ по ФСЕ по частям строения хвощей (листья, стебли и их смесь) показал, что листья и стебли значительно различаются между собой. На графике видно, что для листьев и стебля неизменными остаются ФСЕ с кластерными связями ν_{CC} , δ_{CH} , δ_{NH} , а внутримолекулярных связей ФСЕ ν_{CCN} и ν_{OCO} в листьях заметно меньше, тем самым по конфигурации они не тождественны друг другу. Из этого сравнения видно, что структура органической смеси из стеблей и листьев растений ближе к структуре листьев (рис. 3).

При изучении образцов угля среднеюрского возраста, полученных из скважин площади Снежная Томской области, и подстилающих его хвощей *Equisetites sp.* выяснено, что связи C-C, C-N, C-O, N-H остаются близкими по значению [17], а вот углеводородная составляющая в виде связей C-H меньше при сравнении угля и фитолеймы. По конфигурации графиков можно предположить высокую степень насыщенности угля хвощевыми остатками (рис. 4).

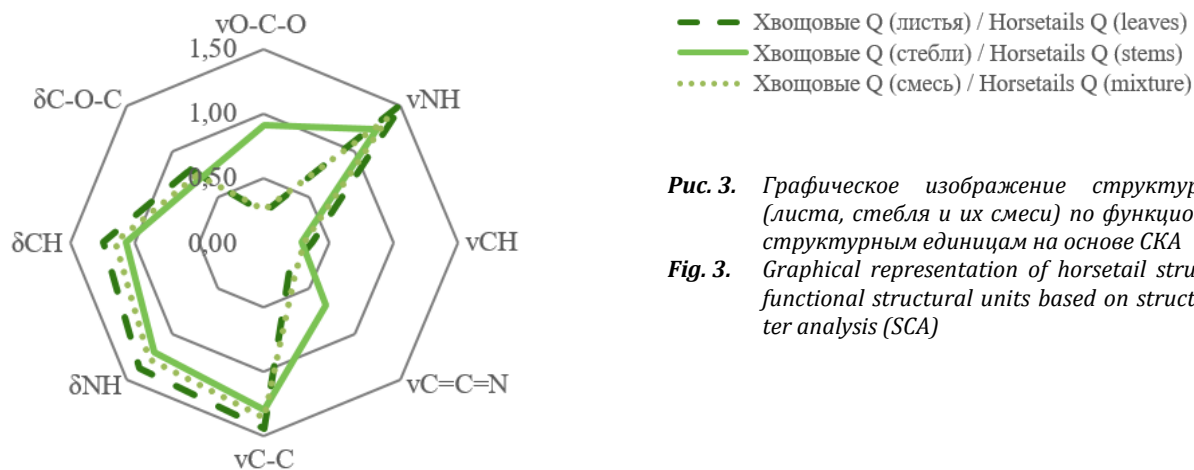


Рис. 3. Графическое изображение структур хвоща (листа, стебля и их смеси) по функциональным структурным единицам на основе СКА
Fig. 3. Graphical representation of horsetail structures by functional structural units based on structural cluster analysis (SCA)

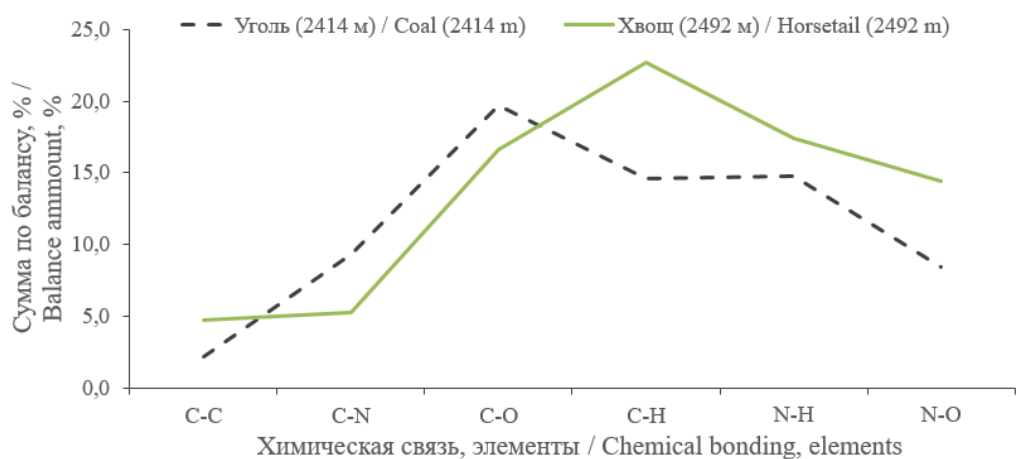


Рис. 4. Сравнение угля и подстилающих его хвощей скважин площади Снежная (Томская область)
Fig. 4. Comparison of coal and its underlying horsetail wells in Snezhnaya area (Tomsk region)

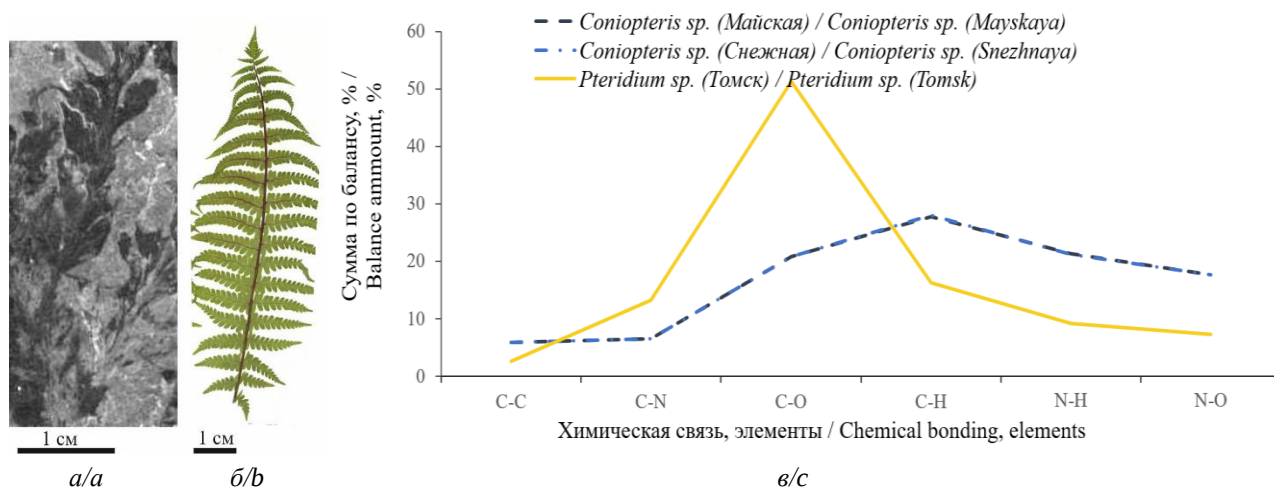


Рис. 5. а) *Coniopteris* sp. (пл. Майская, 569, гл. 3791,0 м, обр. 72/324а); б) *Pteridium* sp. (г. Томск, обр. 72/918); коллекция ТПУ; в) график соотношения структур по балансу ФСЕ на основе группового анализа растений по видам связи элементов C, N, O, H между собой

Fig. 5. а) *Coniopteris* sp. (пл. Mayskaya, 569, depth 3791.0 m, sample 72/324a); б) *Pteridium* sp. (Tomsk city, sample 72/918); TPU collection; в) graph of the relationship of structures according to FSU balance based on group analysis of plants according to the types of connections between elements C, N, O, H

При обугливании структура папоротников претерпевает изменения [18]. Для сравнительного исследования были взяты папоротники рода *Coniopteris* sp. средне-позднеюрского возраста из скважин площадей Майская и Снежная Томской области и современные папоротники рода *Pteridium* sp. из окрестностей города Томска (рис. 5, а, б).

Отмечается увеличение в процентном соотношении от древних к современным растениям количества связей C-N и C-O, при уменьшении количества связей C-C, C-H, N-H, N-O (рис. 5, в).

Проведённый сравнительный анализ количества ФСЕ в образцах папоротников показал, что листья и рахис различаются кластерными связями ν_{CC} и δ_{NH} , они же являются основными признаками для оценки строения смеси, потому что по ФСЕ ν_{CCN} и ν_{OCO} у них полное сходство (рис. 6). Эта особенность является существенным отличительным признаком папоротников и хвощовых.

Среди гинкгоопсид изучались образцы родов *Ginkgo* sp., *Czekanowskia* sp. и *Phoenicopsis* sp. среднеюрского возраста из скважин площадей Двойная, Казанская и Рыбальная Томской области и современные реликтовые представители рода *Ginkgo biloba* L. из Республики Корея (рис. 7, а–г). Тенденция изменения количества связей C-N и C-O такая же, как и у мхов, хвощовых и папоротников. На графиках видно, что конфигурация структуры фитолейм среднеюрских гинкгоопсид (гинкговых и чекановские) в сравнении с современными *Ginkgo biloba* L. сохраняется. В основном за счёт

этих связей происходит рекомбинация в структуре растительного остатка, в котором количество связей C-H, N-H, N-O уменьшается в данной последовательности, но их количество больше, чем в образце гербария (рис. 8).

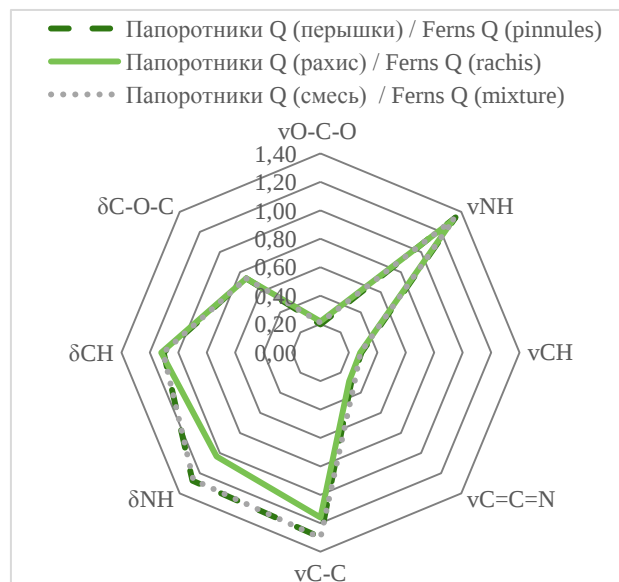


Рис. 6. Графическое изображение структур папоротника по функциональным структурным единицам на основе СКА

Fig. 6. Graphical representation of fern structures by functional structural units based on SCA

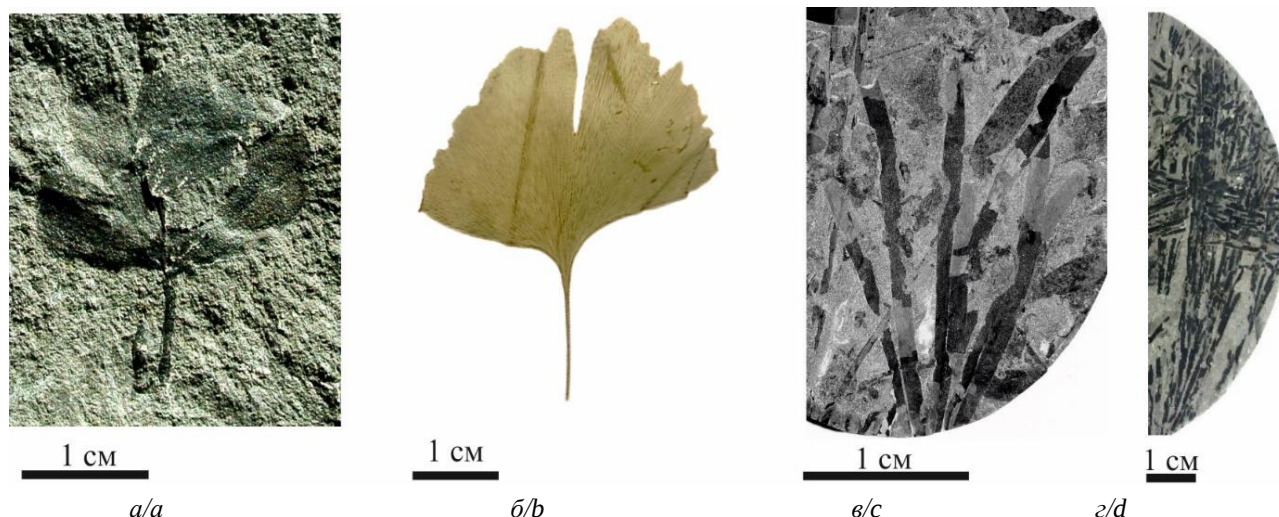


Рис. 7. а) *Ginkgo* sp. (пл. Двойная, 5, гл. 3250,0 м, обр. 72/269); б) *Ginkgo biloba* L. (Республика Корея, обр. 72/923); в) *Phoenicopsis* sp. (пл. Рыбальная, 409, гл. 2485,15 м, обр. 72/853); г) *Czekanowskia* sp. (пл. Казанская, 18, гл. 2503,9 м, обр. 72/744); коллекция ТПУ

Fig. 7. а) *Ginkgo* sp. (area Dvoynaya, 5, depth 3250.0 m, sample 72/269); б) *Ginkgo biloba* L. (Republic Korea, sample 72/923); в) *Phoenicopsis* sp. (area Rybnaya, 409, depth 2485.15 m, sample 72/853); г) *Czekanowskia* sp. (area Kazanskaya, 18, depth 2503.9 m, sample 72/744); TPU collection

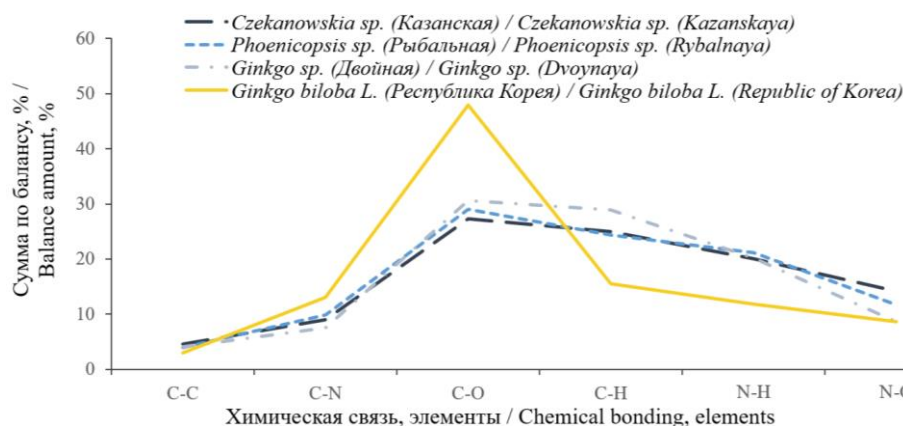


Рис. 8. График соотношения структур гинкгоопсид по балансу ФСЕ на основе группового анализа растений по видам связи элементов C, N, O, H между собой

Fig. 8. Graph of the relationship of structures according to FSU balance based on group analysis of plants according to the types of connections between elements C, N, O, H

Итак, сравнительный анализ показал, что существуют отличительные признаки, которые можно использовать в качестве диагностических признаков (в виде биомаркеров) структурных элементов строения материи на разном уровне её проявления. По спектральной характеристике видно различие строения органических веществ по показателям структурно-группового анализа в виде функциональных групп химических элементов C, N, H, O и структурно-кластерного анализа в виде функциональных структурных единиц – кластеров [19–21]. По результатам сравнительного анализа установлено, что по спектральным показателям функциональных структурных единиц можно проследить структурную изменчивость родственных таксонов.

Выяснено, что количество связей C-N и C-O у изученных мхов, хвощей, папоротников и гинкгоопсид больше в современных растениях, чем в юрских. Количество связей C-N варьирует от 5 до 15 % от общего количества связей у юрских и современных растений соответственно, а количество связей C-O у юрских растений держится на уровне 20–25 %, увеличиваясь к 45–50 % у современных. Это подтверждает известную закономерность процесса углефикации, когда растительные остатки, преобразуясь в углефицированные вещества, теряют молекулярную влагу в виде кислородных соединений O-C-O и частично обогащаются азотом. При этом морфологическое строение растений не меняется.

Количество связей C-C, C-H, N-H, N-O у всех изученных растений, наоборот, уменьшается (C-C на 3–5 %, остальных на 10 %). Эти связи являются неустойчивыми и поэтому не сохраняются в потомственных организмах.

Кроме этого, было установлено структурное различие углефицированных веществ фитолеймы хвоща и угля по количеству связей C-H при близких значениях количества связей C-C, C-N, C-O, N-H.

Выводы

Изучение структуры растений – мхов, хвощей, папоротников и гинкгоопсид как среднепозднеюрских, так и современных, с помощью ИК-спектроскопии даёт качественную и количественную информацию о специфических структурных элементах построения материи.

С применением методологии СКАУФВ диагностика проводится по количеству функциональных структурных единиц, что позволяет различать остатки растений и относить их к определённым группам древних и современных растений.

В частности, проведённые исследования современных и средне-позднеюрских фитолейм мхов, хвощей, папоротников и гинкгоопсид показали, что может происходить рекомбинация связей C-N и C-O на связи C-H, N-H, N-O.

Отмечается молекулярное отличие листа от стебля хвощей и папоротников. В хвощевых отличительным признаком служит количество ФСЕ νCCN и νOCO , а в папоротниках основными признаками являются кластеры νCC и δNH , и эта структурная особенность может служить диагностическим критерием в молекулярной палеоботанике.

Сравнительный анализ углефицированного вещества фитолеймы и угля из скважины Снежная на площади Томской области *Equisetites* sp. показал, что количество связей C-C, C-N, C-O, N-H в веществах образцов близкое, а количество C-H связей в фитолейме хвоща больше.

Таким образом, результаты применения ИК-спектроскопии диффузного отражения, полученные на исследовании молекулярных структур родственных среднепозднеюрских и современных растений (мхов, хвощей, папоротников и гинкгоопсид), открывают новые возможности в области молекулярной палеонтологии, а именно, выявлены диагностические признаки, наиболее информативные при идентификации углефицированных осадков, что важно в понимании эволюции высших растений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кальвин М. Химическая эволюция: молекулярная эволюция, ведущая к возникновению живых систем на Земле и на других планетах / пер. с англ. – М.: Мир, 1971. – 240 с.
2. Schweitzer M.H. Molecular paleontology: some current advances and problems // *Annales de paleontologie*. – 2004. – Vol. 90. – № 2. – P. 81–102. DOI: 10.1016/j.anpal.2004.02.001.
3. Современная палеонтология. Методы, направления, проблемы, практическое приложение: справочное пособие: В 2-х т. / под ред. В.В. Меннера, В.П. Макридина. – М.: Недра, 1988. – Т. 2. – 383 с.
4. Pan Y. Molecular paleontology as an exciting, challenging and controversial field // *National Science Review*. – 2020. – Vol. 7. – № 4. – P. 823. DOI: 10.1093/nsr/nwaa001.
5. Evidence of proteins, chromosomes and chemical markers of DNA in exceptionally preserved dinosaur cartilage / A.M. Bailleul, W. Zheng, J.R. Horner, B.K. Hall, C.M. Holliday, M.H. Schweitzer // *National Science Review*. – 2020. – Vol. 7. – Iss. 4. – P. 815–822. DOI: 10.1093/nsr/nwz206.
6. Chemistry and analysis of organic compounds in dinosaurs / M. Tahoun, M. Engeser, V. Namasivayam, P.M. Sander, C.E. Müller // *Biology*. – 2022. – Vol. 11. – Iss. 5. – P. 670. DOI: 10.3390/biology11050670.
7. Soft-tissue, rare earth element, and molecular analyses of *Dreadnoughtus schrani*, an exceptionally complete titanosaur from Argentina / E.R. Schroeter, P.V. Ullmann, K. Macauley, R.D. Ash, W. Zheng, M.H. Schweitzer, K.J. Lacovara // *Biology*. – 2022. – Vol. 11. – Iss. 8. – P. 1158. DOI: 10.3390/biology11081158.
8. Ayala J.D., Schroeter E.R., Schweitzer M.H. Porphyrin-based molecules in the fossil record shed light on the evolution of life // *Minerals*. – 2024. – Vol. 14. – Iss. 2. – P. 201. DOI: 10.3390/min14020201.
9. Molecular fossils within bitumens and kerogens from the ~1 Ga Lakhanda Lagerstätte (Siberia, Russia) and their significance for understanding early eukaryote evolution / J.P. Duda, H. König, M. Reinhardt et al. // *PalZ*. – 2021. – Vol. 95. – P. 577–592. DOI: 10.1007/s12542-021-00593-4.
10. Gomes W.A., Machado M.F., Alves E.F. Exceptional preservation of nonmineralized biomaterials in Cenozoic fossils of the Mammalia clade // *Research, Society and Development*. – 2022. – Vol. 11. – № 14. – P. 23. DOI: 10.33448/rsd-v11i14.36739.
11. Attenuated total reflection Fourier Transform Infrared (ATR FT-IR) Spectroscopy sensitivity to the thermal decay of bone collagen / B. Thomas, K. Anderson, I. de Silva et al. // *Applied Spectroscopy*. – 2023. – Vol. 77. – Iss. 1. – P. 53–61. DOI: 10.1177/00037028221135634.
12. Alves E.F., Gomes W.A. Preservacao de biomoleculas no registro fossil de vegetalis: estado da arte da Paleobotanica molecular // *Quaternary International*. – 2024. – Vol. 20. – P. 15. DOI: 10.20396/td.v20i00.8676195.
13. Беллами Л. Инфракрасные спектры сложных молекул / пер. с англ. – М.: Изд-во иностр. лит., 1963. – 590 с.
14. Киричкова А.И., Костина Е.И., Быстрицкая Л.И. Фитостратиграфия и флора юрских отложений Западной Сибири. – СПб.: Недра, 2005. – 378 с.
15. Иванов В.П., Рычкова И.В. Палеонтологическая и спектрометрическая характеристика фитолейм средне-позднеюрских растений юго-востока Западной Сибири // *Стратиграфия. Геологическая корреляция*. – 2021. – Т. 29. – № 6. – С. 84–95.
16. Каменева А.И., Платонов В.В. Теоретические основы химической технологии горючих ископаемых. – М.: Химия, 1990. – 287 с.
17. Иванов В.П. Эволюция растений-углеобразователей и флористическая восстановленность верхнепалеозойских углей // *Известия вузов. Геология и разведка*. – 2015. – № 5. – С. 25–31.
18. Development of the integrated approach to stratigraphic subdivision and correlation of Middle–Upper Jurassic deposits in Southeastern West Siberia / I.V. Rychkova, M.I. Shaminova, V.V. Anosov, V.P. Ivanov // *Stratigraphy and Geological Correlation*. – 2019. – Vol. 27. – P. 297–310. DOI: 10.1134/S0869593819030055.
19. Восстановленность и петрографический состав углей Кузнецкого бассейна / В.П. Иванов, А.С. Станкевич, М.Б. Школлер и др. // *Химия твердого топлива*. – 2002. – № 4. – С. 3–19.
20. Иванов В.П., Школлер М.Б., Станкевич А.С. Изменение структурных характеристик и свойств кузнецких углей разной степени метаморфизма и восстановленности в процессе их окисления // *Кокс и химия*. – 2002. – № 5. – С. 4–11.
21. Modes of occurrence of germanium and tungsten in the Spetsugli germanium ore field, Pavlovka brown coal deposit, Russian Far East / S.I. Arbuzov, D.A. Spears, S.S. Ilenok, I.Yu. Chekryzhov, V.P. Ivanov // *Ore Geology Reviews*. – 2021. – Vol. 132. – 103986, p. 14. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2021.103986.

Информация об авторах

Владимир Петрович Иванов, доктор геолого-минералогических наук, профессор отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30; ivp2005@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7468-0174>

Ирина Владимировна Рычкова, кандидат геолого-минералогических наук, доцент отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30; irina.rychkova@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0001-3779-5754>

Марина Геннадьевна Пахтаева, аспирант Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30; mgp3@tpu.ru; <https://orcid.org/0009-0003-8451-8068>

Поступила в редакцию: 14.04.2025

Поступила после рецензирования: 07.05.2025

Принята к публикации: 16.06.2025

REFERENCES

1. Kalvin M. *Chemical evolution: molecular evolution leading to the emergence of living systems on Earth and on other planets*. Moscow, Mir Publ., 1971. 240 p. (In Russ.)
2. Schweitzer M.H. Molecular paleontology: some current advances and problems. *Annales de paleontologie*, 2004, vol. 90, no. 2, pp. 81–102. DOI: 10.1016/j.annpal.2004.02.001.
3. Shishkin M.M., Meyen S.V., Alekseev A.S. *Modern paleontology. Methods, directions, problems, practical application*, Moscow, Nedra Publ., 1988, vol. 2, 383 p. (In Russ.)
4. Pan Y. Molecular paleontology as an exciting, challenging and controversial field. *National Science Review*, 2020, vol. 7, no. 4, p. 823. DOI: 10.1093/nsr/nwaa001.
5. Bailleul A.M., Zheng W., Horner J.R., Hall B.K., Holliday C.M., Schweitzer M.H. Evidence of proteins, chromosomes and chemical markers of DNA in exceptionally preserved dinosaur cartilage. *National Science Review*, 2020, vol. 7, Iss. 4, pp. 815–822. DOI: 10.1093/nsr/nwz206.
6. Tahoun M., Engeser M., Namasivayam V., Sander P.M., Müller C.E. Chemistry and Analysis of Organic Compounds in Dinosaurs. *Biology*, 2022, vol. 11, Iss. 5, p. 670. DOI: 10.3390/biology11050670.
7. Schroeter E.R., Ullmann P.V., Macauley K., Ash R.D., Zheng W., Schweitzer M.H., Lacovara K.J. Soft-tissue, rare earth element, and molecular analyses of *Dreadnoughtus schrani*, an exceptionally complete titanosaur from Argentina. *Biology*, 2022, vol. 11, Iss. 8, p. 1158. DOI: 10.3390/biology11081158.
8. Ayala J.D., Schroeter E.R., Schweitzer M.H. Porphyrin-based molecules in the fossil record shed light on the evolution of life. *Minerals*, 2024, vol. 14, Iss. 2, 201 p. DOI: 10.3390/min14020201.
9. Duda J.P., König H., Reinhardt M. Molecular fossils within bitumens and kerogens from the ~1 Ga Lakhanda Lagerstätte (Siberia, Russia) and their significance for understanding early eukaryote evolution. *PalZ*, 2021, vol. 95, pp. 577–592. DOI: 10.1007/s12542-021-00593-4.
10. Gomes W.A., Machado M.F., Alves E.F. Exceptional preservation of nonmineralized biomaterials in Cenozoic fossils of the Mammalia clade. *Research, Society and Development*, 2022, vol. 11, no. 14, p. 23. DOI: 10.33448/rsd-v11i14.36739.
11. Thomas B., Anderson K., De Silva I. Attenuated total reflection Fourier Transform Infrared (ATR FT-IR) Spectroscopy sensitivity to the thermal decay of bone collagen. *Applied Spectroscopy*, 2023, vol. 77, Iss. 1, pp. 53–61. DOI: 10.1177/00037028221135634.
12. Alves E.F., Gomes W.A. Preservacao de biomoleculas no registro fossil de vegetalis: estado da arte da Paleobotanica molecular. *Quaternary International*, 2024, vol. 20, p. 15. DOI: 10.20396/td.v20i00.8676195.
13. Bellamy L. *Infrared spectra of complex molecules*. Translated from English. Moscow, Foreign Languages Publ. House, 1963. 590 p. (In Russ.)
14. Kirichkova A.I., Kostina E.I., Bystritskaya L.I. *Phytostratigraphy and flora of Jurassic deposits of Western Siberia*. St. Petersburg, Nedra Publ., 2005. 378 p. (In Russ.)
15. Ivanov V.P., Rychkova I.V. Paleontological and spectrometric characteristics of phytoliums of Middle-Late Jurassic plants of the South-east of Western Siberia. *Stratigraphy. Geological correlation*, 2021, vol. 29, no. 6, pp. 84–95. (In Russ.)
16. Kameneva A.I., Platonov V.V. *Theoretical foundations of chemical technology of combustible minerals*. Moscow, Khimiya Publ., 1990. 287 p. (In Russ.)
17. Ivanov V.P. Evolution of carbon-forming plants and floristic restoration of Upper Paleozoic coals. *Izvestiya vuzov. Geology and exploration*, 2015, no. 5, pp. 25–31. (In Russ.)
18. Rychkova I.V., Shaminova M.I., Anosov V.V., Ivanov V.P. Development of the Integrated Approach to stratigraphic subdivision and correlation of Middle–Upper Jurassic deposits in Southeastern West Siberia. *Stratigraphy and Geological Correlation*, 2019, vol. 27, pp. 297–310. DOI: 10.1134/S0869593819030055.
19. Ivanov V.P., Stankevich A.S., Shkoller M.B. and others. Recovery and petrographic composition of coals of the Kuznetsk basin. *Chemistry of solid fuels*, 2002, no. 4, pp. 3–19. (In Russ.)
20. Ivanov V.P., Shkoller M.B., Stankevich A.S. Changes in the structural characteristics and properties of Kuznetsk coals of varying degrees of metamorphism and reduction during their oxidation. *Coke and Chemistry*, 2002, no. 5, pp. 4–11. (In Russ.)
21. Arbuzov S.I., Spears D.A., Ilenok S.S., Chekryzhov I.Yu., Ivanov V.P. Modes of occurrence of germanium and tungsten in the Spetsugli germanium ore field, Pavlovka brown coal deposit, Russian Far East. *Ore Geology Reviews*, 2021, vol. 132, p. 14. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2021.103986.

Information about the authors

Vladimir P. Ivanov, Dr. Sc., Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. ivp2005@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7468-0174>

Irina V. Rychkova, Cand. Sc., Associate Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. irina.rychkova@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0001-3779-5754>

Marina G. Pakhtaeva, Postgraduate Student, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. mgp3@tpu.ru; <https://orcid.org/0009-0003-8451-8068>

Received: 14.04.2025

Revised: 07.05.2025

Accepted: 16.06.2025

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 27.06.2025. Дата выхода журнала: 30.06.2025.
Формат 60х84/8 (А4). Бумага «Снегурочка».
Печать XEROX. Усл. печ. л. 28,85. Уч.-изд. л. 26,09.
Заказ 294-25. Тираж 500 экз. Цена свободная.



Издательство

ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Адрес учредителя, редакции, издателя, типографии:
634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.