

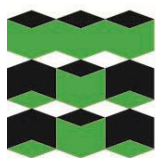


ИЗВЕСТИЯ ТОМСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА ИНЖИНИРИНГ ГЕОРЕСУРСОВ

**Том 336, № 2, 2025
Издается с 1903 г.**

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

**Volume 336, № 2, 2025
Published since 1903**



**ТОМСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ**

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

**ИЗВЕСТИЯ
ТОМСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
ИНЖИНИРИНГ ГЕОРЕСУРСОВ**

Том 336, № 2, 2025

Издательство
Томского политехнического университета
2025

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Семилетов И.П., гл. редактор, д-р геогр. наук (Россия)
Оствальд Р.В., канд. хим. наук (Россия)
Савичев О.Г., д-р геогр. наук (Россия)
Покровский О.С., канд. геол.-минерал. наук (Франция)
Старостенко В.И., д-р физ.-мат. наук (Украина)
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)
Абуталипова Е.М., д-р техн. наук (Россия)
Полищук В.И., д-р техн. наук (Россия)
Хамитов Р.Н., д-р техн. наук (Россия)
Зюев А.М., д-р техн. наук (Россия)
Третьяк А.Я., д-р техн. наук (Россия)
Арбузов С.И., д-р геол.-минерал. наук (Россия)
Ковалев В.З., д-р техн. наук (Россия)
Романенко С.В., д-р хим. наук (Россия)
Кириянова Л.Г., канд. филос. наук (Россия)
Строкова Л.А., д-р геол.-минерал. наук (Россия)
Мазуров А.К., д-р геол.-минерал. наук (Россия)
Мостовщиков А.В., д-р техн. наук (Россия)
Хакимьянов М.И., д-р техн. наук (Россия)
Боярко Г.Ю., д-р экон. наук, канд. геол.-минерал. наук (Россия)
Стрижак П.А., д-р физ.-мат. наук (Россия)
Мин Р.С., д-р хим. наук (Россия)
Глазырин А.С., выпуск. редактор, д-р техн. наук (Россия)

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

Подписной индекс в объединённом каталоге «Пресса России» – 18054

© ФГАОУ ВО НИ ТПУ, 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, № 2, 2025

Tomsk Polytechnic University Publishing House
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)
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

- | | | |
|---|---|---|
| <p>Строение участков с выходами пород фундамента в Уймонской впадине Горного Алтая по данным наземной электроразведки с использованием трехмерного моделирования
 Неведрова Н.Н., Кузина З.Я., Санчаа А.М.</p> <p>Identification of erosion processes in the soils of the coastal territory of lake Kandrykul (Republic of Bashkortostan)
 Fattakhova L.A., Kuzina D.M., Antonenko V.V.</p> <p>Тонко вкрапленные акцессорные и рудные минералы месторождения Верхнее-Золотое
 Сластников В.В.</p> <p>Лигносulfонатная система для ингибирования отложений солей кальция
 Тептерева Г.А., Рольник Л.З., Агишев Р.Е., Гусарова Е.И., Нугаев А.И.</p> <p>Железомарганцевая геохимическая аномалия в питьевых водах: оценка рисков для здоровья населения
 Беляновская А.И., Солдатова Е.А., Крестьянникова Е.В.</p> <p>Разработка системы автоматической сортировки мусора на основе Arduino
 Хасанова Л.Н., Скуратова П.Н., Мусина С.А.</p> <p>Анализ влияния свойств и конфигурации пласта на коэффициент извлечения нефти при разработке нефтегазоконденсатных месторождений
 Кряжев В.А., Кряжев Я.А., Гильманов А.Я., Шевелёв А.П.</p> <p>Повышение эффективности извлечения пластовой жидкости из сильноглинистых пластов путем воздействия на ее структуру электрическим полем
 Хабибуллин М.Я.</p> <p>Процессы формирования подотвальных вод и мероприятия по минимизации их влияния на гидросферу (на примере Лёвихинского рудника, Средний Урал)
 Рыбникова Л.С., Рыбников П.А., Галин А.Н.</p> <p>Структурно-групповой состав и коллоидная стабильность синтетических асфальтеноподобных азотистых оснований
 Корнеев Д.С.</p> <p>Состав и строение терригенных отложений живетского яруса среднего отдела девонской системы по результатам изучения разреза в зоне передовых надвигов Урала (Гремячинский район Пермского края)
 Афонин И.В., Плюснин А.В., Томилина Е.М., Рабцевич Е.С., Иванов И.С., Мякшин И.В., Сулима А.И.</p> <p>Определение водонасыщенности песчаника в нефтегазонасыщенных низкоомных коллекторах при присутствии поверхностной электропроводимости
 Мельник И.А.</p> <p>Типизация сейсмогеологических комплексов доюрских отложений юго-востока Западной Сибири
 Волкова А.А.</p> | <p>7</p> <p>17</p> <p>26</p> <p>42</p> <p>52</p> <p>66</p> <p>79</p> <p>92</p> <p>102</p> <p>116</p> <p>126</p> <p>141</p> <p>151</p> | <p>Structure of areas with basement rocks outcrops in the Uimonskaya depression of the Gorniy Altay based on electrical survey data using three-dimensional modeling
 Nevedrova N.N., Kuzina Z.Ya., Sanchaa A.M.</p> <p>Выявление эрозионных процессов в почвах прибрежной территории озера Кандрыкуль (Республика Башкортостан)
 Фаттахова Л.А., Кузина Д.М., Антоненко В.В.</p> <p>Finely interspersed accessory and ore minerals of the Verkhnee-Zolotoe deposit
 Slastnikov V.V.</p> <p>Lignosulfonate system for inhibition of calcium salt deposits
 Tepтерева G.A., Rolnik L.Z., Agishev R.E., Gusarova E.I., Nugaev A.I.</p> <p>Geochemical anomaly of iron and manganese in drinking water: health risk assessment
 Belyanovskaya A.I., Soldatova E.A., Krestyannikova E.V.</p> <p>Development of an Arduino-based automatic waste sorting system
 Khasanova L.N., Skuratova P.N., Musina S.A.</p> <p>Analysis of formation properties and configuration impact on the oil recovery factor during the production of oil and gas condensate fields
 Kriazhev V.A., Kriazhev Ya.A., Gilmanov A.Ya., Shevelev A.P.</p> <p>Increasing the efficiency of formation fluid extraction from highly clayey formations by affecting its structure with an electric field
 Khabibullin M.Ya.</p> <p>Processes of formation of waste waters and measures to minimize their impact on the hydrosphere (on the example of the Levikhinsky mine, Middle Urals)
 Rybnikova L.S., Rybnikov P.A., Galin A.N.</p> <p>Structural-group composition and colloidal stability of synthetic asphalten-like nitrogen bases
 Korneev D.S.</p> <p>Composition and structure of terrigenous deposits of the Givetian stage of the middle division of the Devonian system based on the results of studying the section in the zone of frontal thrust of the Urals (Gremyachinsky district of Perm Krai)
 Afonin I.V., Plyusnin A.V., Tomilina E.M., Rabtsevich E.S., Ivanov I.S., Myakshin I.V., Sulima A.I.</p> <p>Sandstone water saturation in oil and gas saturated low resistivity reservoirs with surface conductivity
 Melnik I.A.</p> <p>Pre-Jurassic seismogeological complexes typification in the south-east of Western Siberia
 Volkova A.A.</p> |
|---|---|---|

- Математическая модель снижения потерь активной мощности регулированием реактивной мощности на предприятиях с непрерывным циклом производства**
Рахмонов И.У., Ниёзов Н.Н., Ниматов К.Б., Ушаков В.Я., Омонов Ф.Б., Реймов К.М., Нажимова А.М.
- Влияние системы воздухообмена на температурный режим локальной рабочей зоны крупногабаритного помещения при работе газового инфракрасного излучателя**
Борисов Б.В., Вяткин А.В., Кузнецов Г.В., Максимов В.И., Нагорнова Т.А.
- Исследование возможности автоматической настройки кривых относительных фазовых проницаемостей для задач адаптации геолого-гидродинамической модели**
Бельтюков Д.А., Кочнев А.А., Ван Лей, Галкин С.В.
- Распределение химических элементов в системе вода–порода (на примере Железнодорожного ключа в долине реки Ини)**
Новиков Д.А., Вакуленко Л.Г., Максимова А.А., Николenco О.Д., Деркачев А.С., Фомина (Садыкова) Я.В., Хващевская А.А.
- Закономерности концентрирования ртути в годовых кольцах деревьев территорий Сибири (Россия) и Республики Вьетнам**
Ле Т.Х.Ш., Барановская Н.В., Ляпина Е.Е., Крачнакова М.Г.
- Дегидрирование изобутана в присутствии CO₂ на CrO_x/SiO₂ катализаторе, модифицированном металлами 2 группы**
Скрипаль Н.С., Королев Н.С.
- Разработка экспериментальной методики прогнозирования стадии воспламенения аэрозвеси на основе визуализации видеофайлов процесса горения**
Сечин А.И., Патраков Ю.Ф., Мезенцева И.Л., Сечин А.А.
- 159 Mathematical model for reducing active power losses by regulating reactive power at enterprises with continuous production mode**
Rakhmonov I.U., Niyozov N.N., Nimatov K.B., Ushakov V.Ya., Omonov F.B., Reymov K.M., Najimova A.M.
- 172 Impact of the air exchange system on temperature conditions of the local working area of a large-sized premise during the gas infrared heater operation**
Borisov B.V., Vyatkin A.V., Kuznetsov G.V., Maksimov V.I., Nagornova T.A.
- 190 Possibility of automatic adjustment of relative phase permeability curves for the tasks of geologic-hydrodynamic model adaptation**
Beltukov D.A., Kochnev A.A., Wang Lei, Galkin S.V.
- 201 Distribution of chemical elements in the water–rock system (based on the example of a Zheleznodorozhny spring in the valley of the Inya river)**
Novikov D.A., Vakulenko L.G., Maksimova A.A., Nikolenko O.D., Derkachev A.S., Fomina (Sadykova) Ya.V., Khvacshevskaya A.A.
- 215 Patterns of mercury concentration in annual tree rings in Siberia (Russia) and the Republic of Vietnam**
Le T.H.S., Baranovskaya N.V., Lyapina E.E., Krachnakova M.G.
- 231 Dehydrogenation of isobutane in the presence of CO₂ on CrO_x/SiO₂ catalyst modified by the metals of the 2nd group**
Skripal N.S., Korolev N.S.
- 241 Development of an experimental method for predicting the ignition stage of an airborne suspension based on visualization of combustion video files**
Sechin A.I., Patrakov Yu.F., Mezentseva I.L., Sechin A.A.

УДК 550.837.31+550.8.05
DOI: 10.18799/24131830/2025/2/4604
Шифр специальности ВАК: 1.6.9

Строение участков с выходами пород фундамента в Уймонской впадине Горного Алтая по данным наземной электроразведки с использованием трехмерного моделирования

Н.Н. Неведрова, З.Я. Кузина, А.М. Санчаа✉

*Институт нефтегазовой геологии и геофизики им А.А. Трофимука Сибирского отделения
Российской академии наук, Россия, г. Новосибирск*

✉SanchaaAM@ipgg.sbras.ru

Аннотация. *Актуальность* исследования обусловлена существенным развитием туристической инфраструктуры на территории Горного Алтая, связанной со строительством гостиниц, новых коммуникаций, дорог, а также с реконструкцией имеющейся. В связи с этим актуальны задачи поиска, разведки и доразведки месторождений строительных материалов, рудных полезных ископаемых геофизическими методами. Знания о строении верхней части разреза необходимы для картирования водоносных горизонтов с целью бурения гидрологических скважин. Кроме того, поскольку Горный Алтай относится к территориям высокой сейсмоопасности, важно выделение сейсмогенерирующих разломных структур для корректного сейсмораионирования. *Цель:* уточнение глубинного и приповерхностного строения Уймонской впадины методами электроразведки. Исследования геоэлектрического строения впадины начаты в 2011 г. глубинными зондированиями становлением электромагнитного поля и вертикальными электрическими зондированиями. В 2018 г. был добавлен метод электротомографии на нескольких участках впадины для построения детальных моделей верхней части разреза. Глубины до фундамента по данным зондирования становлением электромагнитного поля и вертикального электрического зондирования в западной и центральной части впадины вдали от горного обрамления достигают 500 м, а в восточной части – до 1 км, при этом на ряде участков наблюдаются выходы на дневную поверхность коренных пород, строение и происхождение которых до сих пор непонятно. *Результаты.* Представлены геоэлектрические модели по данным электротомографии одного из участков с выходом коренных пород, для верификации и уточнения которых выполнено численное трехмерное моделирование. По результатам метода электротомографии установлено, что наблюдаемые на дневной поверхности выходы коренных пород не являются подповерхностной высокоомной неоднородностью небольшого размера. Это объект, уходящий на глубину более чем на 45 м с наклонными и субвертикальными боковыми границами. Согласование результатов всех использованных методов – зондирования становлением электромагнитного поля, вертикального электрического зондирования и электротомографии – позволило обосновать модели общего геоэлектрического строения участка исследования и предположить существование протяженной внутривпадинной перемычки в западной части впадины, частично выходящей на поверхность. Эти результаты могут быть полезны не только для решения указанных прикладных задач, но и важны специалистам геологических направлений при рассмотрении этапов формирования впадины, что относится к фундаментальным проблемам геодинамики, структурной геологии и неотектоники всего Горного Алтая.

Ключевые слова: Горный Алтай, Уймонская впадина, наземная электроразведка, электротомография, геоэлектрическое строение, численное трехмерное моделирование, инверсия

Благодарности: Работа выполнена в рамках темы НИР FWZZ-2022-0025 Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук.

Для цитирования: Неведрова Н.Н., Кузина З.Я., Санчаа А.М. Строение участков с выходами пород фундамента в Уймонской впадине Горного Алтая по данным наземной электроразведки с использованием трехмерного моделирования // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 2. – С. 7–16. DOI: 10.18799/24131830/2025/2/4604

UDC 550.837.31+550.8.05
DOI: 10.18799/24131830/2025/2/4604

Structure of areas with basement rocks outcrops in the Uimonskaya depression of the Gorniy Altay based on electrical survey data using three-dimensional modeling

N.N. Nevedrova, Z.Ya. Kuzina, A.M. Sanchaa✉

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation

✉SanchaaAM@ipgg.sbras.ru

Abstract. Relevance. Significant development of tourist infrastructure in the Gorniy Altay, associated with the construction of hotels, campsites, guest houses, new communications, roads, as well as the reconstruction of existing ones. In this relation the tasks of search, exploration and additional exploration of deposits of building materials, ore minerals by geophysical methods are relevant. Knowledge about the structure of the upper part of the section is required for mapping aquifers in order to drill demanded hydrological wells. In addition, since Gorniy Altay belongs to the territories of high seismic hazard, it is important to identify seismic-generating fault structures for correct seismic zoning. **Aim.** To clarify the deep and near-surface structure of the Uimonskaya depression using electrical exploration methods. Studies of the geoelectric structure of the depression began in 2011 with depth soundings by transient electromagnetic and vertical electric soundings. In 2018, an electrotomography method was added in several areas of the trough to build detailed models of the upper part of the section. Depths to the basement according to transient electromagnetic and vertical electric soundings data in the western and central part of the depression, away from the mountain frame, reach 500 m, and in the eastern part – up to 1000 m, and in some areas there are bedrock outcrops on the day surface, the structure and origin of which are still unclear. **Results.** The paper presents geoelectric models based on the data of the electrotomography method of one of the sites with bedrock outcrops, for verification and refinement of which numerical three-dimensional modeling was performed. According to the results of the electrotomography method, it was established that the bedrock outcrops observed on the day surface are not a subsurface high resistivity heterogeneity of small size. It is an object going to a depth of more than 45 m with inclined and subvertical lateral boundaries. Harmonization of the results of all used methods – transient electromagnetic, vertical electric soundings and electrotomography – allowed substantiating the models of the general geoelectric structure of the study area and assuming the existence of an extended intermountain cofferdam in the western part of the trough, partially extending to the surface. These results can be useful not only for solving the above-mentioned applied problems, but also important for specialists of geological directions when considering the stages of formation of the depression, which refers to the fundamental problems of geodynamics, structural geology and neotectonics of the entire Gorniy Altay.

Keywords: Gorniy Altay, Uimonskaya depression, electrical survey, electrical tomography, geoelectrical structure, numerical three-dimensional modeling, inversion

Acknowledgements: The work was funded by project FWZZ-2022-0025 of the A.A.Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

For citation: Nevedrova N.N., Kuzina Z.Ya., Sanchaa A.M. Structure of areas with basement rocks outcrops in the Uimonskaya depression of the Gorniy Altay based on electrical survey data using three-dimensional modeling. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 2, pp. 7–16. DOI: 10.18799/24131830/2025/2/4604

Введение

Горный Алтай как часть внутриконтинентального орогена характеризуется присутствием горных хребтов с высотами, достигающими 4,5 тыс. м, и многочисленных внутригорных рамповых впадин. Эта горная страна относится к территориям высокой сейсмоопасности, что определяется наличием сейсмогенерирующих структур, инициирующих землетрясения разной магнитуды, включая крупные, разрушительные [1]. В связи с этим актуальны исследования строения впадин для выделения активных разломов: внутривпадинных и на

границах с горным обрамлением. Кроме того, практически в каждой из впадин разведаны либо прогнозируются месторождения полезных ископаемых, а также присутствуют полные разрезы континентальных осадочных отложений кайнозоя, важные для изучения четвертичной истории геологического развития всего региона. Уймонская впадина является одной из крупнейших заселенных межгорных впадин Горного Алтая, но при этом наименее изучена.

Полевые работы в Уймонской впадине методами наземной электроразведки с контролируемыми

источниками были начаты в 2011 г. и включали измерения методами зондирования становлением поля (ЗСБ) и вертикальных электрических зондирования (ВЭЗ). Ранее на этой территории геофизические измерения не проводились, что отчасти связано с географическим положением впадины, её труднодоступностью. Уймонская впадина, в отличие от Чуйской и Курайской депрессий, находится в стороне от основной дорожной магистрали – Чуйского тракта, и добраться туда можно через сложный горный перевал. По результатам интерпретации этих методов получены первые представления о её глубинном строении [2]. Местоположение глубокой скважины с забоем в 400 м, впервые пробуренной на территории впадины в 2013 г., было выбрано по данным ЗСБ. Скважиной были вскрыты неоген-четвертичные отложения, в которых неоген представлен верхнемиоценовыми тонкозернистыми озерными отложениями туерьской свиты, обладающей низкими удельными электрическими сопротивлениями (УЭС). Верхний перекрывающий комплекс мощностью в 300 м сложен грубозернистыми фациями четвертичного возраста (бекенская, башкауская свиты, озерно-ледниковые отложения), характеризующимися высокими значениями сопротивлений [3]. Получено очень хорошее согласование стратиграфических границ литологических комплексов по скважинным данным с результатами ЗСБ. Невязка между границами, полученными двумя разными методами, составила менее 5 % [4].

После некоторого перерыва электроразведочные работы были возобновлены в 2018 г. с использованием метода ЗСБ с размером генераторной петли 500×500 м и добавлением электротомографии (ЭТ) на нескольких участках впадины для изучения приповерхностных структур. По результатам интерпретации всего объема данных ЗСБ и ВЭЗ за разные годы были построены глубинные геоэлектрические модели впадины, результаты представлены в нескольких публикациях [4, 5].

Строение верхней части депрессии осложняется выходами на дневную поверхность коренных пород фундамента, представленных метаморфическими породами ордовикского возраста ($sPR_2(O_1)t$). На участках выходов этих пород в полевые сезоны с 2020 по 2023 гг. были выполнены измерения методом ЭТ по системе профилей в западной и центральной частях Уймонской впадины. В текущей статье исследуются измерения, приуроченные к выходам пород фундамента в западной части депрессии (рис. 1). Строение таких участков до сих пор было непонятно. Можно рассмотреть несколько предположений образования выходов коренных пород. По мнению специалистов-геологов, это либо обрывки вершук антиклиналий, сдвинутые мощ-

ными тектоническими движениями, либо верхняя часть антиклинальных складок кровли фундамента, поднятая на дневную поверхность в местах его относительно неглубокого залегания во время резкой активизации орогенных процессов в четвертичном периоде, которая образует внутривпадинную перемычку [6].

Первые модели строения участков с выходами коренников в западной части впадины представлены в работе [7] на основе интерпретации данных ЭТ с использованием двух-, трехмерной инверсии данных. В рамках данного исследования с целью верификации и уточнения строения таких участков будет представлена геоэлектрическая модель по данным ЭТ, обоснованная трехмерным численным моделированием, и варианты её согласования с глубинными геоэлектрическими моделями. На схеме фактического материала показаны измерения методами электроразведки в Уймонской впадине, включающие системы профилей ЭТ на участках выходов пород фундамента и ближайшие к ним пункты ЗСБ (рис. 1). Схема построена с использованием информационной системы QGIS. Полевые данные и результаты интерпретации ЗСБ будут привлечены для обоснования моделей ЭТ и общего геоэлектрического строения участков исследования.

В настоящее время в Уймонской впадине стремительно развиваются туристические направления, с чем связано строительство инфраструктуры (гостиниц, баз отдыха, кемпингов и пр.). Поэтому актуальны поиски и разведка месторождений строительных материалов и доразведка имеющихся. Востребовано изучение строения верхней части разреза в связи с картированием водоносных горизонтов для бурения новых гидрологических скважин. Необходимо также отметить, что во впадине прогнозируется большеобъемная золотоносная россыпь [8], что требует обоснования геофизическими технологиями. Кроме того, актуальность исследования заключается в решении фундаментальных проблем – построенные модели с использованием комплекса методов электроразведки (ЗСБ, ВЭЗ, ЭТ) позволят продвинуться в понимании геологических этапов формирования впадины, что важно для задач геодинамики, структурной геологии, неотектоники всего Горного Алтая.

Аппаратура, программные средства и результаты по данным электротомографии

Для уточнения строения приповерхностных особенностей, описанных выше, был использован метод ЭТ. Особенностью данного метода является применение многоэлектродной аппаратуры, в которой электрод может быть как питающим, так и приемным при многократных измерениях.

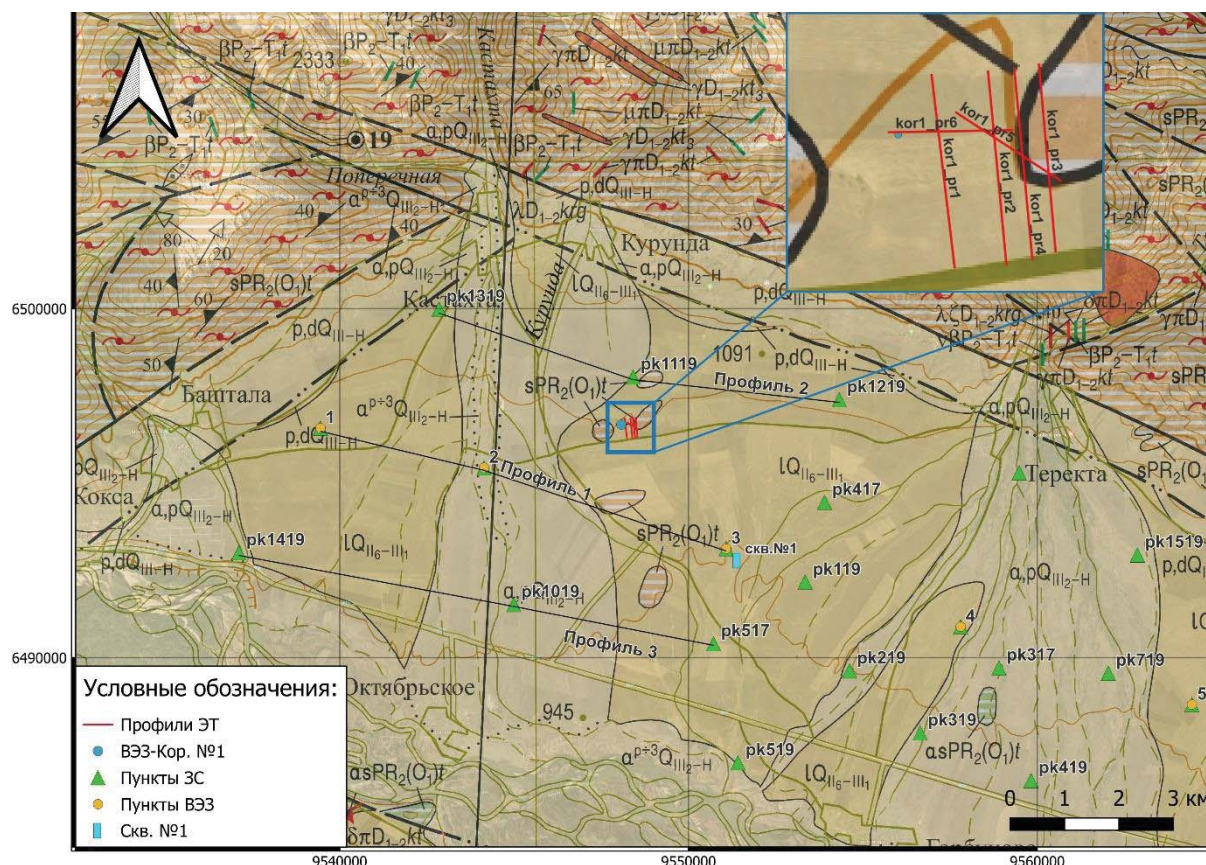


Рис. 1. Обзорная схема на подложке рельефа и геологической карты (1:200000) [6, 9] западной части Уймонской впадины, созданная в QGIS

Fig. 1. Overview scheme on the underlying relief and geologic map (1:200000) [8, 9] of the western part of the Uimonskaya depression, created in QGIS

Такая методика значительно увеличивает производительность и разрешающую способность исследований методом сопротивлений. Высокая плотность наблюдений по профилю позволяет производить двумерную интерпретацию, то есть изучать более сложные модели сред, отличных от горизонтально-слоистых, коим является исследуемый выход пород фундамента.

Полевые данные ЭТ получены с использованием современной аппаратуры «Скала-48», разработанной в ИНГГ СО РАН. Была выбрана установка Шлюмберже, 48 электродов, так как она обеспечивает одинаково хорошую чувствительность к вертикальным и горизонтальным границам [10], шаг между электродами составлял 5 м. Измерения выполнены по четырем параллельным профилям (1, 2, 3, 4) с использованием нагоняющей расстановки (roll along) для нужной длины профиля [10] и двум секущим (5, 6) с одной расстановкой электродов.

Результаты инверсии данных ЭТ позволяют определить геоэлектрическое строение участков верхней части разреза до глубины около 50 м. На первом этапе интерпретации была получена геоэлектрическая модель коренника на основе трех-

мерной инверсии данных (рис. 2). Инверсия была выполнена с учетом рельефа, который может влиять на результаты исследований [11, 12] в программе DiInSo (Версия 2.5 от 25.04.2023) [13, 14]. В процессе решения обратных задач (используется схема Гаусса–Ньютона) требуется построение тетраэдральной сетки, в отличие от широкоизвестной программы Res3dinv, в которой используется прямоугольная [15, 16]. Поскольку межгорные впадины имеют сложное геоэлектрическое строение, модель точнее разбивается тетраэдральной сеткой. В программе есть удобная возможность изменять параметры инверсии в зависимости от поставленной задачи с целью получения наиболее приемлемого результата, например, что в конкретном случае важнее – установить геометрию объекта или его сопротивление. Так, в нашем случае мы меняли параметр регуляризации, скорость роста ячеек с глубиной и ограничивали максимальный размер ячеек генерируемой сетки. Как известно, обратная задача некорректна и может иметь множество решений, поэтому для заверки полученных моделей применяют численное моделирование, как двумерное, так и трехмерное, как, например, в работах

[17, 18]. Таким образом, следующим этапом интерпретации было численное моделирование. Общая геометрия объекта оценивалась по результатам трехмерной инверсии и космоснимка; размеры выхода коренных пород, углы наклона предположительных его границ вблизи профилей 1, 2 и 3 оценивались по результатам двумерной инверсии полевых данных. Исходя из привязки к геологическим данным породы фундамента представлены метаморфическими образованиями ордовикского возраста [19], характеризующимися повышенными значениями удельного сопротивления (1000–2000 Ом·м) по сравнению со вмещающими породами осадочного заполнения впадины (до 700 Ом·м), представленными озерно-ледниковыми и ледниковыми отложениями – валунным галечником, гравием, валунником и песком [7]. Основываясь на вышесказанном, при формировании моделей были выбраны следующие значения УЭС: для выхода коренных пород – 2000 Ом·м, для вмещающей среды – 588 Ом·м.

Математическое моделирование, выполненное также с использованием программы DiInSo, осуществляется в трехмерной области, которая задана с помощью тетраэдральной сетки. В выбранном программном комплексе нет встроенной функции генерации сетки, таким образом, данный шаг выполняется в сторонней программе. Программный комплекс DiInSo поддерживает форматы следующих генераторов сеток: GiD, SALOME, NetGen и Gmsh, пользователь может выбрать одну из пере-

численных выше программ по собственным предпочтениям. Для геометрического построения модели с последующей генерацией конечно-элементной сетки в данной работе применялась программа GiD [20]. В качестве примера на рис. 3, а показана модель, в которую входит объект исследования во вмещающей однородной среде с линией размещения электродов по профилю 3 (рис. 3, а) и отдельно сам объект (коренные породы) с сеткой (рис. 3, б). Мелкость разбиения задавалась следующим образом: на линии электродов – 2, на поверхностях и объеме объекта – 10 и в среде – 50. Под мелкостью разбиения понимается размер элементов (линий, поверхностей, объемов). Размер здесь – это средняя длина ребра соответствующего элемента сетки.

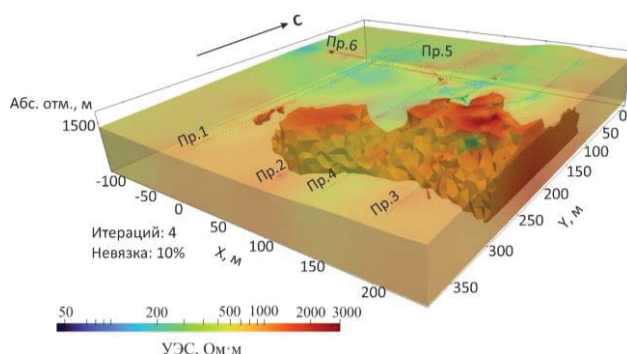


Рис. 2. 3D-инверсия полевых данных
Fig. 2. 3D inversion of field data

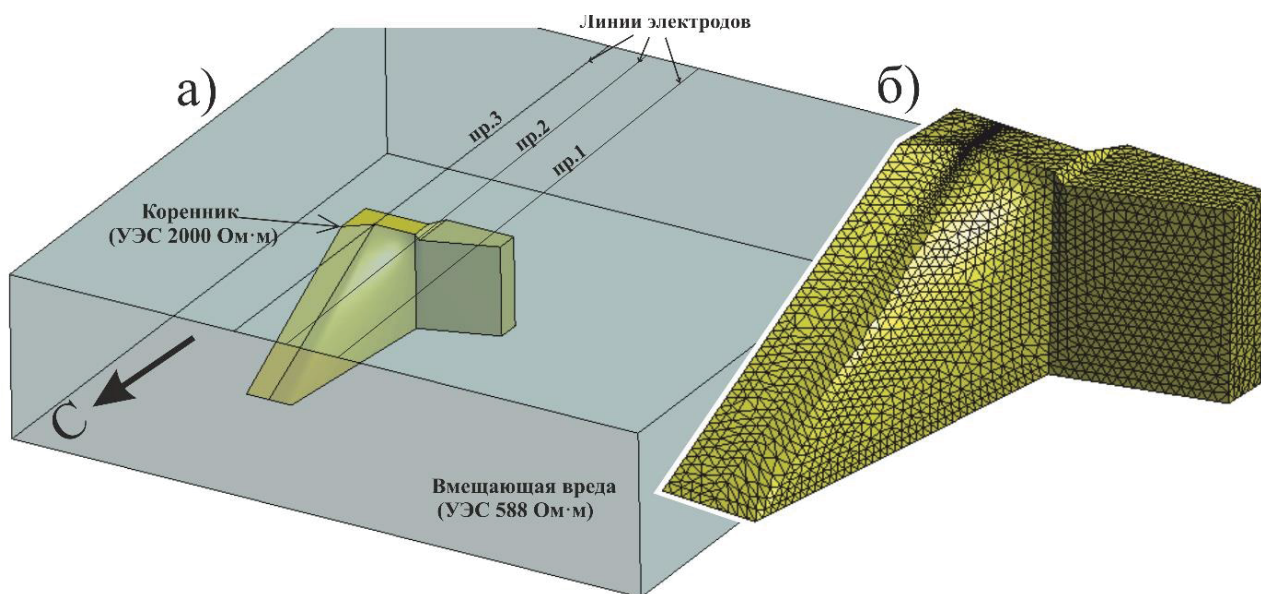


Рис. 3. а) модель № 1, построенная в программе GiD; б) фрагмент объекта-коренника с тетраэдральной сеткой разбиения с мелкостью 5

Fig. 3. а) model no. 1 built in GiD program; б) fragment of a basement rock object with a tetrahedral partitioning network with fineness 5

Прямая задача рассчитывалась для каждого из профилей в отдельности с целью уменьшения времени расчета. В результате решения прямой задачи формируются файлы для проведения 2D- и 3D-инверсии. Геоэлектрические двумерные и трехмерные разрезы модельных данных далее сопоставляются с результатами двумерной и трехмерной инверсий полевых данных. На данном этапе исследования сравнение осуществляется качественным путем, визуальной оценкой. В будущем планируется выполнение численного сравнения результатов двумерной инверсии модельных и полевых данных.

На первом этапе моделирования было рассмотрено несколько моделей для верификации углов наклона боковых границ выхода коренных пород в области третьего профиля, по результатам которого были сделаны следующие предположительные выводы: боковые грани объекта наклонные и в районе профиля 3 угол наклона составляют с южной стороны 50° , а с северной – 25° . В области размещения профилей 1 и 2 границы коренника субвертикальные.

Также высокоомная аномалия имеет направленность в западном направлении, где в непосредственной близости расположен выход коренных пород меньшего размера. Таким образом, можно сделать предположение о том, что эти два выхода пород фундамента представляют собой одну структуру. Для подтверждения данного факта требуются дополнительные полевые измерения.

В рамках данной статьи моделирование осуществлялось для оценки вертикального размера исследуемого объекта, учитывая описанные выше выводы.

Общими параметрами двух моделей являются: УЭС вмещающей среды – $588 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, УЭС объекта (коренника) – $2000 \text{ Ом}\cdot\text{м}$; размер области моделирования – $1400 \times 1400 \times 350 \text{ м}$; углы наклона боковых границ объекта в районе профиля 3 – 50° , а для северной границы – 25° , в областях 1 и 2 профилей углы субвертикальные.

Для осуществления инверсии модельных данных использовались следующие одинаковые параметры: ограничение максимального размера ячейки – 100, ограничение глубины исследования – 45 м, добавлено усиление контрастности.

Изменяющимся параметром является вертикальный размер исследуемого объекта.

Для Модели № 1 вертикальный размер объекта составляет 50 м. Для Модели № 2 вертикальный размер объекта составляет 200 м. Результаты трехмерной инверсии модельных данных представлены на рис. 4, а, б.

Анализируя получившиеся результаты трехмерной инверсии для двух разных моделей, можно отметить ряд отличий. Так, для модели № 2 выделяемый объем среды в районе профилей 2 и 3 получился больше относительно результата инверсии для модели № 1 с учетом одинакового диапазона УЭС, что качественно имеет большую согласованность с трехмерной инверсией полевых данных (рис. 3). Также в области профиля 3 для модели № 2 наблюдаемая высокоомная аномалия более уверенно прослеживается на глубину, что визуально больше согласуется с инверсией полевых данных.

Исходя из полученных результатов и качественного их сопоставления с полевыми данными можно сделать вывод, что боковые грани объекта наклонные и в районе профиля 3 составляют угол наклона с южной стороны 50° , а с северной – 25° . Самая северная граница объекта имеет более пологий угол, скорее всего, есть соединение с более северным выходом коренных пород. Для выяснения этого факта требуются дополнительные полевые измерения. В области размещения профилей 1 и 2 границы коренника субвертикальные. Кроме того, вертикальный размер объекта-коренника больше глубины исследования методом ЭТ, и можно считать, что это не подповерхностная неоднородность, имеющая небольшие размеры, а объект, уходящий на глубину более 45 м.

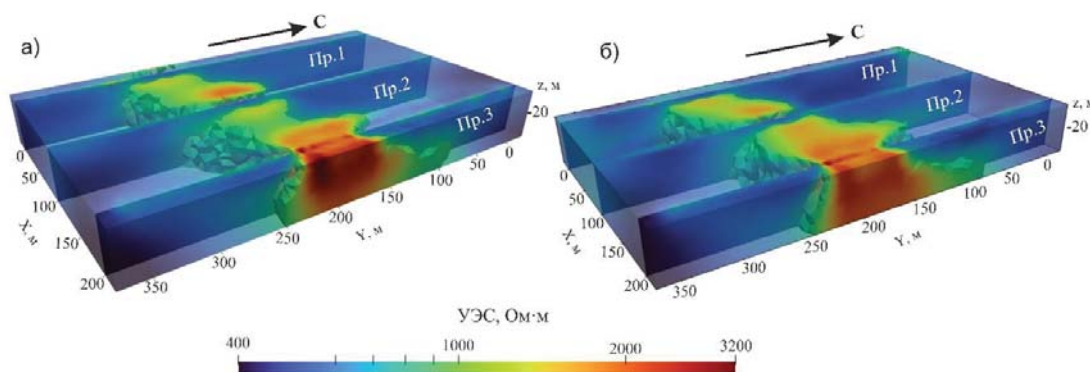


Рис. 4. Результат 3D-инверсии модельных данных, выделен объем среды, с диапазоном УЭС $>900 \text{ Ом}\cdot\text{м}$: а) модель 1; б) модель 2

Fig. 4. Result of 3D inversion of model data, the volume of the medium is highlighted, with a range of electrical resistivity $>900 \text{ ohm}\cdot\text{m}$: а) model 1; б) model 2



Рис. 6. Кривая ВЭЗ и геоэлектрическая модель

Fig. 6. VES curve and geoelectric model

На основе результатов метода ЭТ можно пере-
 рассмотреть геоэлектрическую модель в пункте ЗСБ
 1119, который расположен наиболее близко к рас-
 сматриваемому объекту. Из двух эквивалентных гео-
 электрических моделей с одной и той же погрешно-
 стью (2,99 %), где УЭС и мощности слоев остались
 прежними, но глубина до кровли фундамента в одной
 модели определена на глубине 886 м, а в другой – на
 186 м, выбрана модель с глубиной до кровли фунда-
 мента на глубине 186 м. Эквивалентная вторая мо-
 дель обоснована присутствием небольших характер-
 ных искажений кривой ЗСБ на поздних временах,
 которые обусловлены неоднородностью опорного
 горизонта (фундамента), для первой модели мы пы-
 тались их учесть введением 6-го проводящего гори-
 зонта. Вариант обновленного геоэлектрического раз-
 реза по второму профилю ЗСБ представлен на рис. 7.

Закключение

По результатам проведенных работ представле-
 на геоэлектрическая модель участка в Уймонской
 впадине с выходами коренных пород на дневную
 поверхность по данным ЭТ, обоснованная трех-
 мерным численным моделированием. Установлено,
 что вертикальный размер объекта-коренника боль-
 ше глубины исследования метода ЭТ, и можно счи-

тать, что это не подповерхностная неоднородность,
 имеющая небольшие размеры, а объект, уходящий
 на глубину более 45 м с наклонными боковыми
 границами. Далее рассмотрены варианты согласо-
 вания разноточинных геоэлектрических моделей
 по данным ЭТ, ЗСБ и ВЭЗ. Совместный анализ ре-
 зультатов всех использованных методов позволяет
 верифицировать строение верхней части разреза
 участка исследования и предложить ещё один ва-
 риант его глубинного строения.

Учитывая тот факт, что в западной части впади-
 ны присутствуют еще несколько аналогичных
 участков, вытянутых цепочкой с севера на юг
 (рис. 1), вполне вероятно предположить, что
 наблюдаемые на дневной поверхности выходы ко-
 ренных отложений фиксируют видимую часть про-
 тяженной внутривпадинной перемычки.

На выходах пород фундамента, расположенных
 южнее участка исследования, рассмотренного в
 этой статье, также проводятся исследовательские
 работы методом ЭТ. Совместный анализ всего объ-
 ёма данных метода ЭТ, возможно, заставит пере-
 рассмотреть структурные и геодинамические особен-
 ности строения и кайнозойской эволюции Уймон-
 ской котловины.

Профиль 2

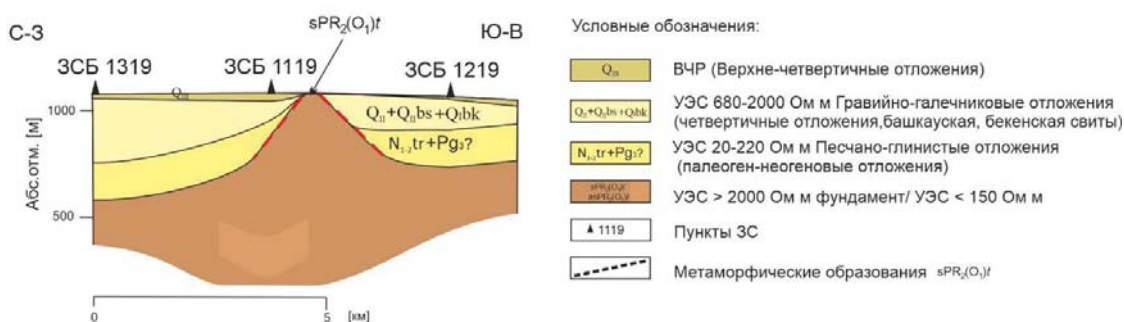


Рис. 7. Геоэлектрический разрез по профилю ЗСБ

Fig. 7. Geoelectric section along the TEM profile

Полученные результаты могут быть интересны специалистам-геологам в решении фундаментальных проблем, связанных со строением и геодинамикой алтайских впадин. Практическая значимость изучения строения верхней части разреза востребована в связи с

картированием водоносных горизонтов для бурения новых гидрологических скважин, которых крайне не хватает местному населению, а также для поиска и разведки прогнозируемых месторождений рудных полезных ископаемых, строительных материалов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Деев Е.В. Зоны концентрации древних и исторических землетрясений Горного Алтая // Физика Земли. – 2019. – № 3. – С. 71–96. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0002-33372019371-96>.
2. Новые данные о строении Уймонской впадины (Горный Алтай) / Е.В. Деев, Н.Н. Неведрова, Г.Г. Русанов, А.М. Санчаа, С.М. Бабушкин, Д.В. Кречетов, И.Н. Ельцов, И.Д. Зольников // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. – 2012. – Т. 9. – № 1. – С. 15–23.
3. Опорный разрез неоген-четвертичных отложений в Уймонской впадине (Горный Алтай) / Г.Г. Русанов, Е.В. Деев, И.Д. Зольников, Л.Б. Хазин, И.В. Хазина, О.Б. Кузьмина // Геология и геофизика. – 2017. – Т. 58 – № 8. – С. 1220–1233.
4. Геоэлектрическое строение Уймонской впадины по данным наземной геоэлектрики / А.М. Санчаа, Н.Н. Неведрова, И.О. Шапаренко, А.Е. Шалагинов, С.М. Бабушкин // Интерэкспо ГЕО-Сибирь – «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология»: Материалы XV международной научной конференции. – Новосибирск, 24–26 апреля 2019. – Новосибирск: ИНГГ СО РАН, 2019. – Т. 2. – № 2. – С. 137–144.
5. Санчаа А.М., Неведрова Н.Н., Бабушкин С.М. Строение Уймонской впадины по данным нестационарных электромагнитных зондирований // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. – 2020. – Т. 43. – № 3. – С. 66–76. DOI: 10.20403/2078-0575-2020-3-66-76.
6. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:200000. Издание второе. Серия Горно-Алтайская. Лист М-45–XIV (Усть-Кокса). – М.: ФГУП «ВСЕГЕИ», 2019.
7. Кузина З.Я., Неведрова Н.Н., Санчаа А.М. Особенности строения верхней части разреза Уймонской впадины Горного Алтая по данным электротомографии с использованием трехмерных программных средств // Вестник МГТУ. – 2023. – Т. 26. – № 2. – С. 160–169. DOI: 10.21443/1560-9278-2023-26-2-160-169.
8. Бутвиловский В.В., Аввакумов А.Е., Гутак О.Я. Рассыпная золотоносность гор юга Западной Сибири. Историко-геологический обзор и оценка возможностей. – Новокузнецк: КузГПА, 2011.
9. Геологическая библиотека GeoKniga. URL: <https://www.geokniga.org/maps/30425> (дата обращения: 31.01.2024)
10. Электротомография: аппаратура, методика и опыт применения / Е.В. Балков, Г.Л. Панин, Ю.А. Манштейн, А.К. Манштейн, В.А. Белобородов // Геофизика. – 2013. – № 6. – С. 54–63.
11. A systematic study of topography effect of ERT based on 3-D modeling and inversion / D.B. Lu, Q.Y. Zhou, S.A. Junejo et al. // Pure Appl. Geophys. – 2015. – Vol. 172. – P. 1531–1546. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00024-014-1015-4>.
12. Resistivity modelling with topography / S. Penz, H. Chauris, D. Donno, C. Mehl // Geophysical Journal International. – 2013. – Vol. 194. – № 3. – P. 1486–1497. DOI: <https://doi.org/10.1093/gji/ggt169>.
13. DiInSo: Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021662035; заявл. 13.07.2021; опубл. 21.07.2021.
14. Мариненко А.В., Эпов М.И., Оленченко В.В. Программный комплекс DiInSo для решения прямых и обратных задач электротомографии в нестандартных постановках // Инженерная и рудная геофизика 2020: Тезисы докладов 16-й научно-практической конференции и выставки. – Пермь, 14–18 сентября 2020. – С. 1–9.
15. Loke M.H., Dahlin T. A comparison of the Gauss–Newton and quasi-Newton methods in resistivity imaging inversion // Journal of Applied Geophysics. – 2002. – Vol. 49. – № 3. – P. 149–162.
16. Loke M.H., Barker R.D. Practical techniques for 3D resistivity surveys and data inversion // Geophysical Prospecting. – 1996b. – № 44. – P. 499–523.
17. Torrese P., Pilla G. 1D-4D electrical and electromagnetic methods revealing fault-controlled aquifer geometry and saline water uprising // Journal Hydrology. – 2021. – Vol. 600. – P. 126568
18. Torrese P. Subsurface structure of the proposed Sirente meteorite crater: insights from ERT synthetic modelling // Acta Geodaetica et Geophysica. – 2022. – Vol. 57. – P. 563–587.
19. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:200000. Издание второе. Серия Горно-Алтайская. Лист М-45–XIV (Усть-Кокса). Объяснительная записка / А.М. Попова, В.И. Крупчатников, А.Л. Пономарев, Г.Г. Русанов, Е.А. Колпакова. – М.: Московский филиал ФГБУ «ВСЕГЕИ», 2019. – 271 с.
20. GiD. URL: <https://www.gidsimulation.com/> (дата обращения: 31.01.2024).

Информация об авторах

Нина Николаевна Неведрова, доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник, Институт нефтегазовой геологии и геофизики им А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук, Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3; NevedrovaNN@ipgg.sbras.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3210-5248>

Зоя Ярославовна Кузина, инженер, Институт нефтегазовой геологии и геофизики им А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук, Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3; z.kuzina@g.nsu.ru

Айдиса Михайловна Санчаа, кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, Институт нефтегазовой геологии и геофизики им А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук, Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3; SanchaaAM@ipgg.sbras.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4523-6661>

Поступила в редакцию: 04.03.2024

Поступила после рецензирования: 11.04.2024

Принята к публикации: 28.11.2024

REFERENCES

1. Deev E.V. Concentration zones of ancient and historical earthquakes of the Altai Mountains. *Physics of the Earth*, 2019, no. 3, pp. 71–96. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.31857/S0002-33372019371-96>.
2. Deev E.V., Nevedrova N.N., Rusanov G.G., Sanchaa A.M., Babushkin S.M., Krechetov D.V., Eltsov I.N., Zolnikov I.D. New data on the structure of the Uimonskaya depression (Mountain Altai). *Geology and mineral resources of Siberia*, 2012, vol. 9, no. 1, pp. 15–23. (In Russ.)
3. Rusanov G.G., Deev E.V., Zolnikov I.D., Khazin L.B., Khazina I.V., Kuzmina O.B. Reference section of Neogene-Quaternary sediments in the Uymonskaya Depression (Gorny Altai). *Geology and Geophysics*, 2017, vol. 58, no. 8, pp. 1220–1233. (In Russ.)
4. Sanchaa A.M., Nevedrova N.N., Shaparenko I.O., Shalaginov A.E., Babushkin S.M. Geoelectric structure of Uimonskaya depression according to ground geoelectric data. *Interexpo GEO-Siberia – Subsoil use. Mining. Directions and technologies of prospecting, exploration and development of mineral deposits. Economics. Geoecology. Proc. of the XV International Scientific Conference*. Novosibirsk, April 24–26, 2019. Novosibirsk, INGG SB RAS Publ., 2019. Vol. 2, no. 2, pp. 137–144. (In Russ.)
5. Sanchaa A.M., Nevedrova N.N., Babushkin S.M. Structure of the Uimonskaya Depression according to the data of non-stationary electromagnetic soundings. *Geology and mineral resources of Siberia*, 2020, vol. 43, no. 3, pp. 66–76. (In Russ.) DOI: [10.20403/2078-0575-2020-3-66-76](https://doi.org/10.20403/2078-0575-2020-3-66-76).
6. *State geological map of the Russian Federation. Scale 1:200000. second ed. Gorno-Altayskaya series. Sheet M-45-XIV (Ust-Koksa)*. Moscow, VSEGEI Publ., 2019. (In Russ.)
7. Kuzina Z.Ya., Nevedrova N.N., Sanchaa A.M. Features of the structure of the upper part of the Uymonskaya section of the Uymonskaya depression of the Altai Mountains according to the data of electrotomography using three-dimensional software. *Vestnik MSTU*, 2023, vol. 26, no. 2, pp. 160–169. (In Russ.) DOI: [10.21443/1560-9278-2023-26-2-160-169](https://doi.org/10.21443/1560-9278-2023-26-2-160-169).
8. Butvilovsky V.V., Avvakumov A.E., Gutak O.Y. *Placer gold-bearing mountains of the south of Western Siberia. Historical and geological review and assessment of opportunities*. Novokuznetsk, KuzGPA, 2011. 241 p. (In Russ.)
9. *Geological library GeoKniga*. (In Russ.) Available at: <https://www.geokniga.org/maps/30425> (accessed 31 January 2024).
10. Balkov E.V., Panin G.L., Manstein Yu.A., Manstein A.K. Electrotomography: Equipment, methodology and application experience. *Geofizika*, 2013, vol. 6, pp. 54–63. (In Russ.)
11. Lu D.B., Zhou Q.Y., Junejo S.A. A systematic study of topography effect of ERT based on 3-D modeling and inversion. *Pure Appl. Geophys.*, 2015, vol. 172, pp. 1531–1546. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00024-014-1015-4>.
12. Penz S., Chauris H., Donno D., Mehl C. Resistivity modelling with topography. *Geophysical Journal International*, 2013, vol. 194, no. 3, pp. 1486–1497. DOI: <https://doi.org/10.1093/gji/ggt169>.
13. *DiInSo: Certificate of state registration of computer program*, no. 2021662035, 2021. (In Russ.)
14. Marinenko A.V., Epov M.I., Olenchenko V.V. DiInSo software package for solving direct and inverse problems of electrotomography in non-standard formulations. *Engineering and Ore Geophysics 2020. Abstracts of the 16th Scientific and Practical Conference and Exhibition*. Perm, September 14–18, 2020. pp. 1–9. (In Russ.)
15. Loke M.H., Dahkin T. A comparison of the Gauss–Newton and quasi-Newton methods in resistivity imaging inversion. *Journal of Applied Geophysics*, 2002, vol. 49, no. 3, pp. 149–162.
16. Loke M.H., Barker R.D. Practical techniques for 3D resistivity surveys and data inversion. *Geophysical Prospecting*, 1996b, no. 44, pp. 499–523.
17. Torrese P., Pilla G. 1D-4D electrical and electromagnetic methods revealing fault-controlled aquifer geometry and saline water uprising. *Journal Hydrology*, 2021, vol. 600, 126568.
18. Torrese P. Subsurface structure of the proposed Sirente meteorite crater: insights from ERT synthetic modelling. *Acta Geodaetica et Geophysica*, 2022, vol. 57, pp. 563–587.
19. *State geological map of the Russian Federation. Scale 1:200000. second ed. Gorno-Altayskaya series. Sheet M-45-XIV (Ust-Koksa)*. Explanatory note by A.M. Popova, V.I. Krupchatnikov, A.L. Ponomarev, G.G. Rusanov, E.A. Kolpakova. Moscow, Moscow branch of VSEGEI Publ., 2019. 271 p. (In Russ.)
20. *GiD*. Available at: <https://www.gidsimulation.com/> (accessed 31 January 2024).

Information about the authors

Nina N. Nevedrova, Dr. Sc., Chief Researcher, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Koptyug avenue, Novosibirsk, 630090, Russian Federation; NevedrovaNN@ipgg.sbras.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3210-5248>

Zoya Ya. Kuzina, Engineer, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Koptyug avenue, Novosibirsk, 630090, Russian Federation; z.kuzina@g.nsu.ru

Aydisa M. Sanchaa, Cand. Sc., Leading Researcher, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Koptyug avenue, Novosibirsk, 630090, Russian Federation; SanchaaAM@ipgg.sbras.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4523-6661>

Received: 04.03.2024

Revised: 11.04.2024

Accepted: 28.11.2024

UDC 631.437.8

DOI: 10.18799/24131830/2025/2/4596

Identification of erosion processes in the soils of the coastal territory of lake Kandrykul (Republic of Bashkortostan)

L.A. Fattakhova✉, D.M. Kuzina, V.V. Antonenko

Kazan Federal University, Kazan, Russian Federation

✉l.a.fattakhova@yandex.ru

Abstract. Relevance. The change of certain environmental factors (water or wind erosion, anthropogenic component) leads to changes of the structure and properties of the soil body. Coastal area soil can already be affected by erosion, which can also negatively affect the quality of water, because washout of the soil particles from the organic-rich upper part of the soil profile can lead to an acceleration of eutrophication processes. Moreover, the recreational activity of these territories increases the anthropogenic load on the soil cover, thereby aggravating soil degradation. That is why the importance of a comprehensive study of the soil disturbance problems caused by erosion and anthropogenic factors is beyond doubt. **Aim.** To analyze the behavior of the magnetic and humus profiles during soil cover degradation due to water erosion. **Object.** Soil profiles of the coastal area of Lake Kandrykul (Republic of Bashkortostan). **Materials and methods.** Magnetic susceptibility was measured using MFK-1A Kappabridge (AGICO). The hysteresis parameters of the studied sedimentary deposits were determined using a coercive spectrometer (J_meter), the Tyurin method was used to determine the level of humus in the soil. **Results.** According to the magnetic susceptibility data, the studied soil profiles can be divided into accumulative (soil profiles 2, 6, 7, 10) and eluvial-illuvial (soil profiles 1, 3, 4, 8, 9) types of distribution of magnetic components. According to the Day–Dunlop diagram, the magnetic grains of the samples of the studied soil profiles belong to the category of pseudo-domain particles. **Conclusions.** Studying magnetic susceptibility and humus level helped us to determine soil profiles as accumulative and eluvial type of magnetic components and humus distribution. We proved that the ferromagnetic component makes the main contribution to the magnetic susceptibility. The method of coercive spectrometry has shown that magnetic grains in the studied soil profiles are pseudo-domain particles, which may indicate their pedogenic origin.

Keywords: coastal area soil, lake eutrophication, soil magnetism, soil erosion, magnetic susceptibility, coercive spectroscopy, soil humus

Acknowledgements. This study was funded by the subsidy allocated to Kazan Federal University for the state assignment project no. FZSM-2023-0023 in the sphere of scientific activities.

For citation: Fattakhova L.A., Kuzina D.M., Antonenko V.V. Identification of erosion processes in the soils of the coastal territory of lake Kandrykul (Republic of Bashkortostan). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 2, pp. 17–25. DOI: 10.18799/24131830/2025/2/4596

УДК 631.437.8

DOI: 10.18799/24131830/2025/2/4596

Шифр специальности ВАК: 03.00.27

Выявление эрозионных процессов в почвах прибрежной территории озера Кандрыкуль (Республика Башкортостан)

Л.А. Фаттахова✉, Д.М. Кузина, В.В. Антоненко

Казанский федеральный университет, Россия, г. Казань

✉l.a.fattakhova@yandex.ru

Аннотация. Актуальность. В последние несколько десятилетий достаточно остро стоит проблема разрушения почв из-за процессов эрозии. Изменение тех или иных факторов природной среды (водная или ветровая эрозия,

антропогенная составляющая) приводит к изменению структуры и свойств почвенного тела. Почвы, расположенные в прибрежных территориях акваторий, уже априори могут испытывать воздействие эрозионных процессов, что также негативно может отражаться на качестве воды в акваториях, ведь смыв почвенных частиц с верхней, богатой органическими веществами, части почвенного профиля может привести к ускорению процессов эвтрофикации. К тому же рекреационная активность данных территорий только увеличивает антропогенную нагрузку на почвенный покров, тем самым усугубляя процессы деградации почв. Таким образом, важность всестороннего изучения проблем деградации почв из-за процессов эрозии и антропогенного фактора не вызывает сомнений. **Цель.** Изучение степени деградации почвенного покрова при возможных процессах протекания водной эрозии с использованием комплекса современных методов магнитного анализа, включающих магнитометрию и коэрцитивную спектрометрию, а также определение содержания гумусового вещества в данных почвах. **Объект.** Почвенные профили прибрежной к озеру Кандрыкуль (Республика Башкортостан) территории. **Методы.** Магнитная восприимчивость получена с использованием MFK1 A Каррабридж (AGICO). Гистерезисные параметры исследуемых почвенных профилей были определены с помощью коэрцитивного спектрометра (J_meter). Для определения гумуса в почве применялся метод Тюринга. **Результаты.** По данным магнитной восприимчивости и определению содержания гумусового вещества изученные почвенные профили можно разделить на аккумулятивный (профили 2, 6, 7, 10) и элювиально-иллювиальный (профили 1, 3, 4, 8, 9) типы распределения магнитных компонентов и гумуса. Согласно диаграмме Дзя–Данлопа, магнитные зерна образцов изученных почвенных профилей относятся к категории псевдооднородных частиц. **Выводы.** По результатам измерений магнитной восприимчивости и анализу содержания гумусового вещества показано, что изученные почвенные профили определяются аккумулятивным и элювиально-иллювиальным типом распределения магнитных составляющих и гумуса. Показано, что ферромагнитная компонента вносит основной вклад в магнитную восприимчивость. Методом коэрцитивной спектрометрии показано, что магнитные зерна в исследуемых почвенных профилях представляют собой псевдооднородные частицы, что может говорить об их педогенном происхождении.

Ключевые слова: прибрежные почвы, эвтрофикация озера, магнетизм почв, эрозия почв, магнитная восприимчивость, коэрцитивная спектроскопия, почвенный гумус

Благодарности: Работа выполнена за счет средств субсидии, выделенной Казанскому федеральному университету для выполнения государственного задания проект № FZSM-2023-0023 в сфере научной деятельности.

Для цитирования: Фаттахова Л.А., Кузина Д.М., Антоненко В.В. Выявление эрозионных процессов в почвах прибрежной территории озера Кандрыкуль (Республика Башкортостан) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 2. – С. 17–25. DOI: 10.18799/24131830/2025/2/4596

Introduction

Soil is the most important natural resource on Earth. The quality of life of all living things, like plants, animals, humans, depends on soil quality and of its condition.

One of the urgent problems today is soil erosion that affects degradation of the soil cover under the impact of such natural factors as water and wind [1, 2]. Water erosion often occurs in the coastal areas of reservoirs, especially during high water season, and leads to the movable topsoil ablation. Therefore, the soil structure is destroyed, nutritious matters are washed out into the reservoir in the form of suspension [3]. This, in its turn, accelerates the processes of reservoir eutrophication and disrupts the natural organo-mineral balance of the soil.

At the same time, the shores of lakes are actively used as a resting-place by a large number of people; this not only exacerbates the problem of soil erosion, but also increases the degree of anthropogenic impact on soils. Therefore, the issues of soil degradation due to the impact of erosion are extremely relevant today and are being studied by scientists from all over the world. For example, the soil erosion as a global problem of our time was emphasized in the scientific literature [4–7]. Moreover, in [1] it was stated that

erosion dramatically worsens the agrochemical characteristics of soil, reducing humus, nitrogen, phosphorus and potassium level. According to N.M. Zholinsky, I.N. Korableva, N.N. Nuzhdin, climate change, especially an increase in average annual temperature, affects the increase in erosion processes formed on arable agrarian landscape [3].

Usage of magnetic methods in the study of both water and wind erosion has been widespread mainly abroad. For example, P. Nazarov and co-authors in their research state that the indicator of soil magnetic susceptibility can be used as a diagnostic criterion of soil erodibility [8]. Also Z. Ding and co-authors studied the characteristics of magnetic susceptibility under various types of land-use in an area subject to wind and water erosion. They made a conclusion that magnetic susceptibility can be used as an indicator to study soil redistribution in areas subject to erosion [9]. Despite the fact that scientific literature has a large number of manuscripts on soil erosion [1, 2, 4] and even manuscripts on using magnetic susceptibility for study soil erosion [8–10], there is almost no data on the study of erosion of reservoir coastal areas by using coercive spectrometry and soil humus state determination.

Materials and Methods

The aim of the research is to analyze the behavior of magnetic and humus profiles during investigation of the soil cover degradation degree of the coastal territory of Kandrykul Lake due to water erosion.

To achieve the research aim, the following tasks were set: to build a graph of the magnetic susceptibility and humus values distribution of the studied soil profiles; to determine the contribution of dia/paramagnetic (χ_p) and ferromagnetic (χ_f) components to magnetic susceptibility; to obtain coercive spectra of isothermal magnetization.

The area of our research is the territory on the shore of the second largest lake of Republic of Bashkortostan – Kandrykul. It lies in a lobe between two low northeastern spurs of the Bugulma-Belebeevskiy upland in the basin of the Usen river. The lake basin is embedded in Ufa sandstones, clay and marly rocks, below which lie Kungur gypsum and anhydrite [11].

The object of our research is the soil profiles of the western riparian land of Lake Kandrykul. The vegetational cover of the studied territory includes groves of broad-leaved oak, birch and oak-birch trees and meadow steppe. Along the coastline of the lake there has been taken 10 soil profiles in total with depth of 120 cm (Fig. 1). 12 soil samples were taken from each profile in layers of 10 cm.

Due to the great difference of parent rocks and the diversity of flora in the research area, there can be

found many types of soil: peat-bogie and slimy-gley types of soil on the north-eastern side of the first lake terrace and calcareous chernozems on the northern. Dark gray cryptopodzol soils are common for the terraces of the southeastern part of the lake drainage area. On the western terraces there are chernozem-like meadow soil with signs of gleyzation [11].

The preliminary preparation of soil samples was carried out in accordance with SS ISO 11464-2015 Soil Quality [12]. The multifrequency magnetic susceptibility meter AGICO MFK1-FA was used to measure magnetic susceptibility χ . Prior to this, all samples were ground in an agate mortar.

Coercive spectra can be used to determine the contribution of the dia/paramagnetic (χ_p) and ferromagnetic (χ_f) components to the magnetic susceptibility. Coercive spectra of isothermal magnetization in the magnetic fields of up to 0.5 T were obtained using a coercive spectrometer (“J_meter”) [13, 14], which allows separate recording of remanent and induced magnetization at room temperature. Samples were magnetized from their natural state. The following parameters were derived from the magnetization curves: saturation remanent magnetization (J_{rs}), saturation magnetization corrected for the paramagnetic component (J_s), bulk coercive force corrected for the paramagnetic component (B_c), coercivity of remanence (B_{cr}).



Изображения © Maxar Technologies, 2021, Картографические данные ©, 2021 100 м

Fig. 1. Sampling scheme

Рис. 1. Схема отбора проб

The humus level was determined by the Tyurin method [15].

The obtained data was processed by using MS Excel and Grapher program.

Results

The magnetic properties of all substances on our planet, including soil, are reflected in their ability to magnetize in an external magnetic field. An important indicator of magnetic properties is magnetic susceptibility that shows the ratio between the magnetization of a substance and its magnetic field intensity. The magnetic properties of soil mainly reflect the combination of primary and secondary minerals and organic matter of soil solid phase. Soil magnetic susceptibility changes during its formation, transformation and migration of iron compounds. This suggests that magnetic susceptibility reflects soil formation and can be considered as a diagnostic indicator.

The humus state of soil is a set of morphological features, total reserves and organic matter properties and processes of its creation, transformation and migration in the soil profile [16].

The characteristics of magnetic properties and the humus level not necessarily to be functionally dependent on each other. However, it is worth considering that the uniform behavior of these parameters values profile curves may partly be mediated by the contribution of biogenic organo-accumulative surface horizons organic matter to the creation of optimal conditions for heterotrophic microorganisms that synthesize magnets [17].

The shape of the curves of humus and magnetic susceptibility along the depth of the profile in Fig. 2–4 shows that the distribution of these parameters is significantly inhomogeneous. The behavior of the curves in Fig. 2 is more typical for the eluvial-illuvial type of profile curves – with the removal of organic matter, clay, sesquioxides, magnetic minerals from the upper horizons and their accumulation in the illuvial horizon with a gradual decrease in their content approach to the soil-forming rock [16]. It can be assumed that soil drainage and movement of finely-dispersed particles with prevailing water currents are taking place in this area.

The graphical analysis in Fig. 3 shows that the distribution curves of the humus content along the depth of the profile are characterized by an accumulative type of distribution, which means the maximum accumulation of organomineral substances from the surface with a gradual decrease in their content with depth [16]. It can be assumed that the washing of the soil column in these profiles occurs only to a certain depth, below which there is a constantly dry dense layer, which leads to a weak

differentiation of these soils and the appearance of a pronounced accumulative type of humus distribution. A slight difference in the behavior of the curves (not a homogeneous but a more ladder-shaped decrease of the humus with depth) is possibly due to different granulometric composition of soil horizons or the type of soil-forming rock. In this way according to the profile humus level curves, the presented soil profiles are mainly characterized by an accumulative type. However, in profiles 1, 4 and 5 we can see obvious movement of humus components deep into the profile, which indicates its eluvio-illuvial nature.

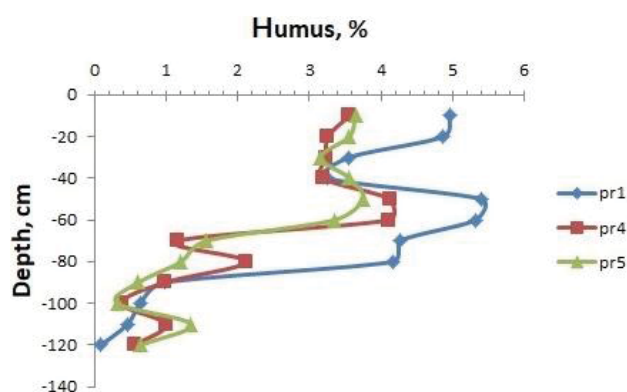


Fig. 2. Humus distribution in profiles 1, 4, 5

Рис. 2. Распределение гумуса в профилях 1, 4, 5

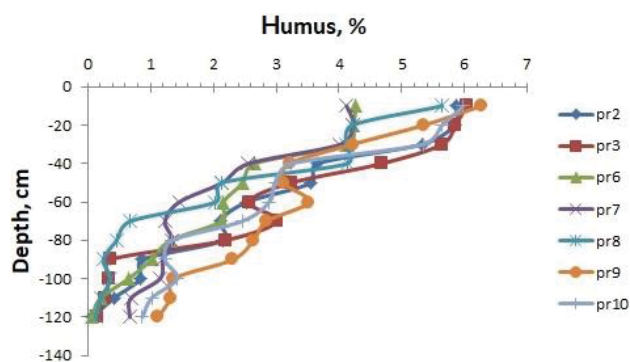


Fig. 3. Humus distribution in profiles 2, 3, 6–10

Рис. 3. Распределение гумуса в профилях 2, 3, 6–10

According to the magnetic susceptibility curves, they can be divided into accumulative (2, 6, 7, 10 profiles) and eluvio-illuvial (1, 3, 4, 8, 9 profiles) types of magnetic component distribution. The fifth profile is difficult to attribute to any type of magnetic components distribution. The accumulative magnetic susceptibility distribution means the pedogenic origin of magnets [18]. In this case, the maximum number of magnetic components is located in the upper part (0–20 cm) of the soil profile, whereas it is difficult to attribute profiles of a mixed type to the accumulative and eluvial-illuvial type of distribution of magnetic minerals, since they

are concentrated throughout the profile and their decrease is observed only from a depth of 60–80 cm. In profiles 2 and 6, the maximum humus content drops to a depth of 15–20 cm, probably due to being in proximity to recreational areas (picnic areas).

The contribution of various components of magnetic susceptibility (dia- and paramagnetic (χ_p),

superparamagnetic (χ_{sp}) and ferrimagnetic (χ_f) was estimated by using coercitive spectrometry. According to the results obtained, the main contribution to the magnetic susceptibility is made by its ferrimagnetic component (χ_f) (Fig. 5), while the contribution of the diamagnetic and superparamagnetic components is much lower.

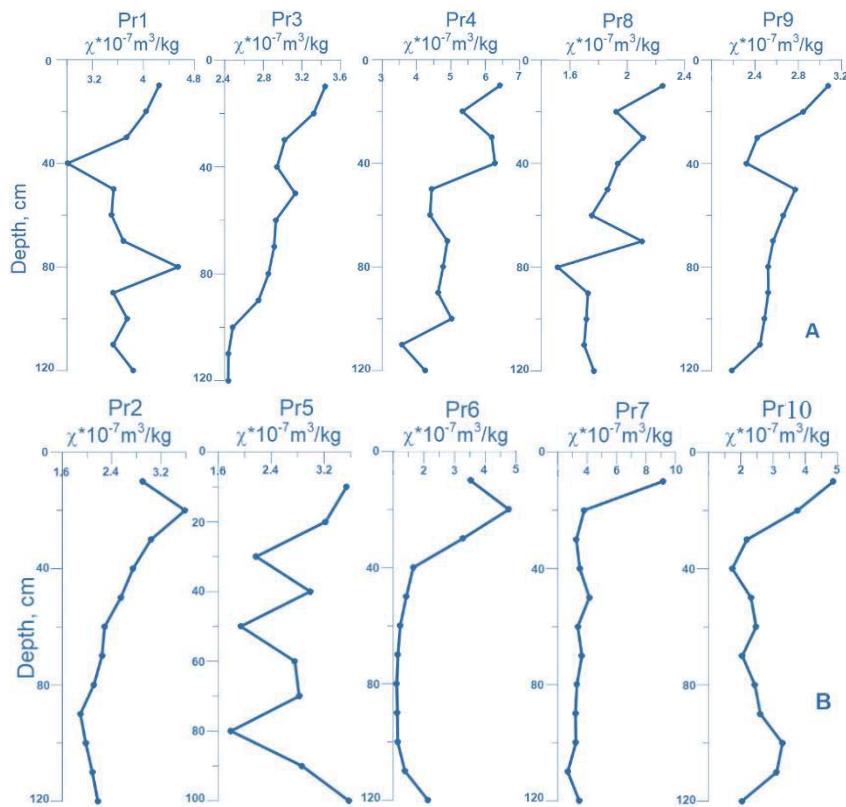


Fig. 4. Distribution of magnetic susceptibility components in profiles by depth: A) profiles 1, 3, 4, 8, 9; B) profiles 2, 5, 6, 7, 10

Рис. 4. Распределение компонентов магнитной восприимчивости в профилях по глубине: А) профили 1, 3, 4, 8, 9; В) профили 2, 5, 6, 7, 10

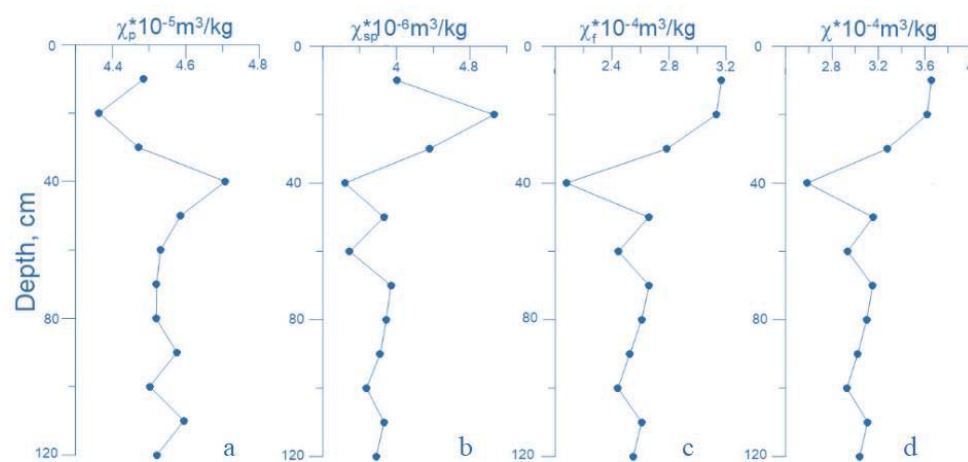


Fig. 5. Contribution of paramagnetic (a), superparamagnetic (b) and ferromagnetic components (c) to magnetic susceptibility (d) (profile 1)

Рис. 5. Вклад парамагнитной (а), суперпарамагнитной (b) и ферромагнитной компонент (с) в магнитную восприимчивость (d) (профиль 1)

Analysis of B_c , B_{cr} , J_s , J_{rs} magnetic hysteresis parameters that depend on the composition, concentration of the magnetic fraction, shape and size of the magnetic grains was conducted to determine the magnetic rigidity and the domain state of the grains of the magnetic fraction [19] (Fig. 6).

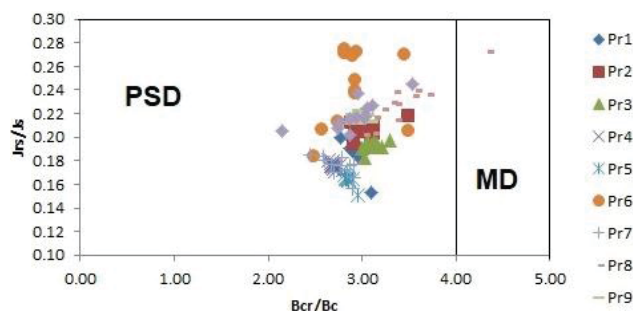


Fig. 6. Day plot

Рис. 6. Диаграмма Дэй

The B_{cr}/B_c and J_{rs}/J_s ratios depict the prevailing grain size and the ratios between magnetic fraction and different domain structures. According to the Day–Dunlop diagram [20], magnetic minerals of the studied soil samples fall into the category of pseudo-single-domain particles. Getting into the area of pseudo-single-domain particles suggests that the magnetic components of the studied soils are present in the clay fraction.

Discussion

Being near the lake, the soil cover of the studied territory is formed in conditions of a wide variety of flora, different geomorphology of the area that cause its heterogeneity.

According to P.R. Slezkin, “humus-forming agents” are fixing in the soil due to gradual accumulating in the soil profile in the form of water extract of the plant litter [21]. According to B.R. Grigoryan, soil humus content is a set of morphological characters that consists of total reserves, organic matter properties and its creation, transformation and migration in the soil profile [16]. The studied meadow chernozemic soil can be characterized as a type of low humus content. The maximum value of humus is not typical for this type of soil and is about 6% on the topsoil (0–30 cm) in the accumulative type of profiles, and about 4.5% at a depth of 50–60 cm in the eluvio-illuvial. Grigoryan considers that humus content in various chernozems ranges from 6 to 12% [16]. As the surface soil layers (top soil) are organo-mineral horizons of humus accumulation during the growth of plant litter, they can protect the soil from water or wind erosion [16]. However, being also an active recreational zone, Kandrykul Lake coastal territory is under strong

pressure on the vegetation cover of the topsoil. Consequently, this leads to the plant litter destruction and increases the risk of erosion, which definitely affects the humus content.

Besides, expert M. Martynova and co-authors think that the highly dispersed structure of the topsoil, where there is plant litter destruction by compaction, leads to losses of humus by the soil [22].

The transformation and migration of iron compounds during the soil-formation change soil magnetic susceptibility. It means that magnetic susceptibility reflects soil-formation and can be considered as a diagnostic indicator [23]. As for the results of magnetic susceptibility within the research area, some magnetic profiles behave like humus profiles. There is both an accumulative type of profile magnetic components distribution, which demonstrates a gradual decline in the magnitude of magnetic susceptibility (profiles 2, 6, 7, 10), and a mixed type (profiles 1, 3, 4, 8, 9), which is characterized by the magnetic component transformation into the upper and middle layers of the soil, where their accumulation occurs.

The presence of more magnetic components in the topsoil could also be explained as consequence of anthropogenic impact, because the indicator of magnetic susceptibility can also be an indirect indicator of technogenic soil pollution [24, 25]. However, due to M. Evans, the accumulative type of magnetic susceptibility distribution in virgin soil obviously implies the pedogenic origin of magnetic components [26]. The particles of pedogenic magnets, as a rule, are determined by fine-dispersed grains, which cause bioinert interactions [26]. According to the obtained coercive spectra measurement data, both accumulative and eluvio-illuvial profiles are characterized by the contribution of the ferrimagnetic component to the magnetic susceptibility and the predominance of pseudo-single-domain particles. This also means that fine-dispersed mineral components were formed as a result of structural transformations of iron minerals that emerged in the soil from the parent rock. Thus, the low humus level can be correlated with possible soil erosion, because magnetic profiles demonstrate the accumulation of magnetic components mainly in the clay fraction, which may be the result of a subsurface structure substance transformation of magnetic minerals of the soil-forming material. Consequently, the elevated values of magnetic susceptibility are not the result of an anthropogenic factor, but a consequence of pedogenesis.

Conclusion

By using the complex of modern methods of magnetic analysis and humus content analysis we studied soil profiles of the coastal area of the Lake

Kandrykul. It was found that the studied soil samples have an accumulative and eluvio-illuvial type of magnetic components and humus distribution. More than that, it was established that the ferromagnetic component of magnetic susceptibility in the studied soil profiles affects its growth. It was also established that magnetic components are present mainly in the clay fraction of the studied soil profiles.

The research shown that the control of soil cover humus level is one of the important tasks of ecological soil monitoring since it can be used to judge the impact of erosion processes occurring in the soil. Thus, outwash, destruction and re-accumulation of soil material due to erosion affects not only the soil disturbance and changes in the properties of soil

profiles, but also enriched with organic matter soil material that accumulates in the upper part of the sediment beds; this can accelerate reservoir obliteration. Therefore, to control this process, monitoring studies can be carried out by using magnetic methods and by analyzing the soil humus level. Also, in order to slow down erosion, it is necessary to carry out special reclamation work of protecting the soil cover.

It is intended in the future to study soil samples and separate <2.5 μm specimens using the differential thermomagnetic analysis to gain more information on the magnetic and mineralogical features of the studied soils.

REFERENCES

1. Khakberdiev O.E., Shamsiddinov T.S. Soil degradation and the effect of erosion on the agrochemical properties of soils. *International Independent Scientific Journal*, 2020, vol. 13, no. 2, pp. 27–29. (In Russ.)
2. Lal R. *Soil erosion research methods*. Boca-Raton, CRC Press, 1994. 352 p.
3. Zholinskiy N.M., Korableva I.N., Nuzhdin N.N. Monitoring of water erosion of soils in agricultural landscapes of the Saratov Right Bank. *Agrarian Bulletin of the South-East*, 2018, no. 3, pp. 34–36. (In Russ.)
4. Hudson N.W. *Soil conservation*. London, Batsford Academic and Educational, 1992. 320 p.
5. Stroosnijder L. Measurement of erosion: is it possible? *Catena*, 2005, vol. 64 (2–3), pp. 162–173. DOI: 10.1016/j.catena.2005.08.004
6. Zhidkin A.P., Makarov O.A., Popova A.R. Modification of the methodology for determining the amount of damage from land degradation caused by soil erosion. *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2023, no. 117, pp. 177–207. (In Russ.) DOI: 10.19047/0136-1694-2023-117-177-207.
7. Golosov V.N., Ivanov M.M., Tsyplenkov A.S., Ivanov M.A., Wakiyama Yo., Konoplev A.V., Konstantinov E.A., Ivanova N.N. Erosion as a factor of transformation of soil radioactive contamination in the basin of the Schekino Reservoir (Tula Region). *Pochvovedenie*, 2021, no. 2, pp. 247–260. (In Russ.) DOI: 10.31857/S0032180X21020064.
8. Nazarok P., Kruglov O., Menshov O., Kutsenko M., Sukhorada A. Mapping soil erosion using magnetic susceptibility. A case study in Ukraine. *Solid Earth Discussions*, 2014, vol. 6, no.1, pp. 831–848. DOI: <https://doi.org/10.5194/sed-6-831-2014>
9. Ding Z., Zhang Z., Li Y., Zhanget L., Zhang K. Characteristics of magnetic susceptibility on cropland and pastureland slopes in an area influenced by both wind and water erosion and implications for soil redistribution patterns. *Soil and Tillage Research*, 2020, vol. 199, 104568. DOI: 10.1016/j.still.2019.104568
10. Liu L., Zhang K., Fu S., Liu B., Huang M., Zhang Z., Zhang F., Yu Y. Rapid magnetic susceptibility measurement for obtaining superficial soil layer thickness and its erosion monitoring implications. *Geoderma*, 2019, vol. 351, pp. 163–173. DOI: 10.1016/j.geoderma.2019.05.030
11. Gareev A.M. *Rivers and lakes of Bashkortostan*. Ufa, Kitap Publ., 2001. 260 p. (In Russ.)
12. *SS ISO 11464-2015. Soil quality – pretreatment of samples for physico-chemical analysis*. Moscow, Mezghosudarstvenny stanart Publ., 2016. 11 p. (In Russ.)
13. Burov B.V., Nurgaliev D.K., Jasonov P.G. *Paleomagnetic analysis*. Kazan, Kazan State University Press, 1986. 167 p. (In Russ.)
14. Jasonov P.G., Nurgaliev D.K., Burov B.V., Heller F. A modernized coercivity spectrometer. *Geol Carpathica*, 1998, vol. 49, pp. 224–226.
15. Rastvorova O.T., Andreev D.P. *Bulk analysis of the organic component of soils. Theory and practice of chemical analysis of soils*. Moscow, GEOS Publ., 2006. pp 115–140. (In Russ.)
16. Grigoryan B.R., Kulagina V.I. *Soil sciences*. Kazan, Kazan State University Publ., 2008. 96 p. (In Russ.)
17. Vodyanitsky Yu.N. *Chemistry and mineralogy of soil iron*. Moscow, V.V. Dokuchaev Soil Institute Press, 2002. 236 p. (In Russ.)
18. Fattakhova L.A., Reshetnikov M.V., Kuzina D.M. Distribution features of mobile forms of heavy metals and magnetic properties of soils in the Dubravniy Forest recreational area of the city of Kazan, Russia. *South of Russia: ecology, development*, 2023, vol. 18, no. 3, pp. 144–152. (In Russ.) DOI: 10.18470/1992-1098-2023-3-144-152
19. Yusupova A.R., Nurgalieva N.G., Kuzina D.M., Kosareva L.R., Yunusova D.A. Features of the material composition of bottom sediments of lake Sabakty (Southern Urals). *Advances in current natural sciences*, 2023, no. 7, pp. 72–81. (In Russ.) DOI: 10.17513/use.38074.
20. Day R., Fuller M., Schmidt V. Hysteresis properties of titanomagnetites: grain-size and compositional dependence. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 1977, vol. 13, no. 4, pp. 260–267. DOI: 10.1016/0031-9201(77)90108-X
21. Slezkin P.R. *Sketches about humus*. Kiev, Type P. Barsky Publ., 1900. 116 p. (In Russ.)
22. Martynova M., Sultanova R., Khanov D., Talipov E., Sazgutdinova R. Forest management based on the principles of multifunctional forest use. *Journal of Sustainable Forestry*, 2021, vol. 40, no. 1, pp. 32–46. DOI: 10.1080/10549811.2020.1734025

23. Fattakhova L.A., Shcherbakov V.P., Kuzina D.M. Petromagnetic properties of fallow soils as an indicator of the content of organic matter in them. *Geophysical Processes and Biosphere*, 2020, vol. 19, no. 1, pp. 51–65. (In Russ.) DOI: 10.21455/GPB2020.1-3
24. Boguta P., Sokołowska Z. Interactions of Zn (II) ions with humic acids isolated from various type of soils. Effect of pH, Zn concentrations and humic acids chemical properties. *PLoS One*, 2016, vol. 11, no. 4, e0153626. DOI: 10.1371/journal.pone.0153626
25. Vadyunina A.F., Babanin V.F. Magnetic susceptibility of some soils of the USSR. *Pochvovedenie*, 1972, no. 10, pp. 56–66. (In Russ.)
26. Evans M., Heller F. *Environmental magnetism: principles and applications of enviromagnetics*. San Diego, Acad Press, 2003. Vol. 86. 299 p. DOI: 10.1029/2012RG000393

Information about the authors

Leysan A. Fattakhova, Cand. Sc., Senior Lecturer, Kazan Federal University, 4/5, Kremlyovskaya street, Kazan, 420008, Russian Federation. l.a.fattakhova@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0002-2192-8591>

Dilyara M. Kuzina, Cand. Sc., Senior Researcher, Kazan Federal University, 4/5, Kremlyovskaya street, Kazan, 420008, Russian Federation. di.kuzina@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0003-1626-4636>

Vadim V. Antonenko, Research Assistant, Kazan Federal University, 4/5, Kremlyovskaya street, Kazan, 420008, Russian Federation. ghost.over.the.sea@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-2311-089X>

Received: 12.03.2024

Revised: 13.06.2024

Accepted: 28.11.2024

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хакбердиев О.Э., Шамсидинов Т.Ш. Деградация почв и влияние эрозии на агрохимические свойства почв // International Independent Scientific Journal. – 2020. – Т. 13. – № 2. – С. 27–29.
2. Lal R. Soil erosion research methods. – Boca-Raton: CRC Press, 1994. – 352 p.
3. Жолинский Н.М., Кораблева И.Н., Нуждин Н.Н. Мониторинг водной эрозии почв в агроландшафтах Саратовского Правобережья // Аграрный вестник Юго-Востока. – 2018. – № 3. – С. 34–36.
4. Hudson N.W. Soil Conservation. – London: Batsford Academic and Educational, 1992. – 320 p.
5. Stroosnijder L. Measurement of erosion: is it possible? // Catena. – 2005. – Vol. 64 (2–3). – P. 162–173. DOI: 10.1016/j.catena.2005.08.004
6. Жидкин А.П., Макаров О.А., Попова А.Р. Модификация методики определения размеров ущерба от деградации земель под воздействием эрозии почв // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. – 2023. – № 117. – С. 177–207. DOI: 10.19047/0136-1694-2023-117-177-207
7. Эрозия как фактор трансформации радиоактивного загрязнения почв на водосборе Щекинского водохранилища (Тульская область) / В.Н. Голосов, М.М. Иванов, А.С. Цыпленков, М.А. Иванов, Ю. Вакияма, А.В. Коноплев, Е.А. Константинов, Н.Н. Иванова // Почвоведение. – 2021. – № 2. – С. 247–260. DOI: 10.31857/S0032180X21020064.
8. Mapping soil erosion using magnetic susceptibility. A case study in Ukraine / P. Nazarov, O. Kruglov, O. Menshov, M. Kutsenko, A. Sukhoroda // Solid Earth Discussions. – 2014. – Vol. 6 (1). – P. 831–848. DOI: 10.5194/sed-6-831-2014
9. Characteristics of magnetic susceptibility on cropland and pastureland slopes in an area influenced by both wind and water erosion and implications for soil redistribution patterns / Z. Ding, Z. Zhang, Y. Li, L. Zhanget, K. Zhang // Soil and Tillage Research. – 2020. – Vol. 199. – 104568. DOI: 10.1016/j.still.2019.104568
10. Rapid magnetic susceptibility measurement for obtaining superficial soil layer thickness and its erosion monitoring implications / L. Liu, K. Zhang, S. Fu, B. Liu, M. Huang, Z. Zhang, F. Zhang, Y. Yu // Geoderma. – 2019. – Vol. 351. – P. 163–173. DOI: 10.1016/j.geoderma.2019.05.030
11. Гареев А.М. Реки и озера Башкортостана / под ред. А.М. Гареева. – Уфа: Изд-во «Китап», 2001. – 260 с.
12. ГОСТ ISO 11464-2015. Качество почвы. Предварительная подготовка проб для физико-химического анализа. – М.: Межгосударственный стандарт, 2016. – 11 с.
13. Буров Б.В., Нургалиев Д.К., Ясонов П.Г. Палеомагнитный анализ. – Казань: Изд-во Казан. ун-та, 1986. – 167 с.
14. A modernized coercivity spectrometer / P.G. Jasonov, D.K. Nurgaliev, B.V. Burov, F. Heller // Geol Carpathica. – 1998. – Vol. 49. – P. 224–226.
15. Растворова О.Т., Андреев Д.П. Валовый анализ органической части почв. Теория и практика химического анализа почв, – М.: ГЕОС, 2006. – С. 115–140.
16. Григорьян Б.Р., Кулагина В.И. Почвоведение. – Казань: Изд-во Казан. гос. ун-та, 2008. – 96 с.
17. Водяницкий Ю.Н. Химия и минералогия почвенного железа. – М.: Почвенный институт им. В.В. Докучаева РАСХН, 2002. – 236 с.
18. Фаттахова Л.А., Решетников М.В., Кузина Д.М. Особенности распределения подвижных форм тяжелых металлов и магнитных свойств почв рекреационной зоны «Дубравный лес» города Казани // Юг России: экология, развитие. – 2023. – Т. 18. – № 3. – С. 144–152. DOI: 10.18470/1992-1098- 2023-3-144-152.
19. Особенности вещественного состава донных отложений озера Сабакты (Южный Урал) / А.Р. Юсупова, Н.Г. Нургалиева, Д.М. Кузина, Л.Р. Косарева, Д.А. Юнусова // Успехи современного естествознания. – 2023. – № 7. – С. 72–81.
20. Day R, Fuller M., Schmidt V. Hysteresis properties of titanomagnetites: grain-size and compositional dependence // Physics of the Earth and Planetary Interiors. – 1977. – Vol. 13 (4). – P. 260–267. DOI: 10.1016/0031-9201(77)90108-X

21. Слезкин П.Р. Этюды о гумусе. – Киев: тип. П. Барского, 1900. – 116 с.
22. Forest management based on the principles of multifunctional forest use / M. Martynova, R. Sultanova, D. Khanov, E. Talipov, R. Sazgutdinova // Journal of Sustainable Forestry. – 2021. – Vol. 40. – № 1. – P. 32–46. DOI: 10.1080/10549811.2020.1734025
23. Фаттахова Л.А., Щербаков В.П., Кузина Д.М. Петромагнитные свойства залежных почв как индикатор содержания в них органического вещества // Геофизические процессы и биосфера. – 2020. – Т. 19. – № 1. – С. 51–65. DOI: 10.21455/GPB2020.1-3
24. Boguta P., Sokołowska Z. Interactions of Zn (II) ions with humic acids isolated from various type of soils. Effect of pH, Zn concentrations and humic acids chemical properties // PLoS One. – 2016. – Vol. 11 (4). – e0153626. DOI: 10.1371/journal.pone.0153626
25. Вадюнина А.Ф., Бабанин В.Ф. Магнитная восприимчивость некоторых почв СССР // Почвоведение. – 1972. – Т. 10. – С. 56–66.
26. Evans M., Heller F. Environmental magnetism: principles and applications of enviromagnetism // Acad Press, San Diego, Int. Geophys. Ser. – 2003. – Vol. 86. – P. 299. DOI: 10.1029/2012RG000393

Информация об авторах

Лейсан Айдаровна Фаттахова, кандидат биологических наук, доцент, Институт геологии и нефтегазовых технологий, Казанский федеральный университет, Россия, 420008, г. Казань, ул. Кремлевская, 4/5. l.a.fattakhova@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0002-2192-8591>

Диляра Мтыгулловна Кузина, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, Институт геологии и нефтегазовых технологий, Казанский федеральный университет, Россия, 420008, г. Казань, ул. Кремлевская, 4/5. di.kuzina@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0003-1626-4636>

Вадим Вячеславович Антоненко, младший научный сотрудник, Институт геологии и нефтегазовых технологий, Казанский федеральный университет, Россия, 420008, г. Казань, ул. Кремлевская, 4/5. ghost.over.the.sea@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-2311-089X>

Поступила в редакцию: 12.03.2024

Поступила после рецензирования: 13.06.2024

Принята к публикации: 28.11.2024

УДК 553.08:553.4:553.086

DOI: 10.18799/24131830/2025/2/4620

Шифр научной специальности: 1.6.4

Тонко вкрапленные акцессорные и рудные минералы месторождения Верхнее-Золотое

В.В. Сластников✉

ООО «Теллур Северо-Восток», Россия, г. Санкт-Петербург

✉ v_slastnikov@mail.ru

Аннотация. Актуальность. Определяется важностью расширения ресурсной базы меди и полиметаллов РФ: Верхнее-Золотое серебряно-медное месторождение локализовано в пределах рудного узла, специфическими полезными ископаемыми которого являются олово и свинец. Изучение акцессориев позволит лучше понять процессы рудообразования для месторождений, чуждых окружающим его по металлогенической специализации. **Цель.** Установить характер распределения тонковкрапленных акцессорных и рудных минералов и их приуроченность к определённым ассоциациям сульфидов и метасоматическим изменениям. **Методы.** Микроскопия электронная растровая и оптическая в отражённом и проходящем поляризованном свете. **Результаты и выводы.** Проведено исследование акцессорной и, для серебра, рудной, минерализации пород центральной части месторождения Верхнее-Золотое (серебро и медь). Генезис месторождения является дискуссионным: его рудная специализация не соответствует таковой рудного района, на территории которого более ожидаема вольфрамовая или оловянная, а не медная минерализация. Олово и вольфрам были диагностированы в керновых пробах, отобранных на Верхнем-Золотом, методом ICP-MS при отсутствии их фаз размером более 0,1 мм. Исследование с использованием сканирующей электронной микроскопии было проведено с целью доказательства гипотезы о том, что касситерит и вольфрамит встречаются в виде тонких включений микронного размера в породе и прожилках. В коллекции из 38 аншлифов были обнаружены не только касситерит и вольфрамит, но и самородное золото, серебро, уранинит и монацит. На Верхнем-Золотом олово, вольфрам и цирконий образуют свои собственные минералы, а не входят в состав сульфидов в качестве примесей. Таким образом, их ассоциация с сульфидными прожилково-вкрапленными рудами, вероятно, краевой части порфировой или, по другим данным, колчеданной системы носит пространственный, а не синхронный характер. Образование мелких включений золота, серебра, монацита и настурана шло вместе с образованием вкрапленных и прожилково-вкрапленных сульфидных руд – продукта циркуляции растворов или флюидов в трещиноватой толще эффузивных пород вулканической постройки. Генезис рассеянного касситерита и шеелита, судя по особенностям его размещения, вероятно, синхронен с процессами пропилитизации во вмещающих вулканитах, содержащих сульфидные включения, и обусловлен близостью объектов, специализирующихся на олове и вольфраме.

Ключевые слова: Верхнее-Золотое, Приморье, касситерит, шеелит, монацит, настуран, флюорит, золото, серебро, тонкая вкрапленность

Благодарности: Автор статьи благодарит компанию N-Mining LLC за предоставление возможности отбора коллекции образцов в 2014 г. Автор выражает глубокую благодарность коллективам кафедры геологии месторождений полезных ископаемых Горного Университета, г. Санкт-Петербург, и Ресурсного центра микроскопии и микроанализа Научного парка СПбГУ, где проводились исследования, профессору кафедры геохимии Института наук о Земле СПбГУ, доктору геолого-минералогических наук Елене Геннадьевне Пановой за ценные консультации во время подготовки текста настоящей статьи.

Для цитирования: Сластников В.В. Состав тонко вкрапленных акцессорных рудных минералов месторождения Верхнее-Золотое // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 2. – С. 26–41. DOI: 10.18799/24131830/2025/2/4620

UDC 553.08:553.4:553.086

DOI: 10.18799/24131830/2025/2/4620

Finely interspersed accessory and ore minerals of the Verkhnee-Zolotoe deposit

V.V. Slastnikov✉

Tellur S-V LLC, Saint-Petersburg, Russian Federation

✉v_slastnikov@mail.ru

Abstract. Relevance. The importance of expanding the resource base of copper and polymetals of the Russian Federation: Verkhnee-Zolotoe silver-copper deposit is localized within an ore node specialized in tin and lead – the study of accessories will allow a better understanding of ore formation for deposits that are alien to its surrounding metallogenic specialization. **Aim.** To establish the nature of the distribution of finely interspersed accessory ore minerals and their conjunction with certain sulfide associations and metasomatic changes. **Methods.** Electron scanning and optical microscopy in reflected and transmitted polarized light. **Results and conclusions.** The author has studied the accessory mineralization of rocks in the central part of the Verkhnee-Zolotoe deposit (silver and copper). The genesis of the deposit is debatable: its ore specialization does not correspond to that of the ore region, in which tungsten or tin mineralization is more expected, rather than copper one. Tin and tungsten were diagnosed in core samples taken on the Verkhnee-Zolotoe by ICP-MS method in the absence of their phases with a size of more than 0.1 mm. The study using scanning electron microscopy was carried out to prove the hypothesis that cassiterite and wolframite occur as micron-sized thin inclusions in host rock and veins. Not only cassiterite and wolframite, but native gold, silver, uraninite and monazite as well were found in the collection of 38 polished sections. On the Verkhnee-Zolotoe, gold, tin, tungsten and zirconium form their own minerals, and are not included in the composition of sulfides as impurities. Thus, their association with sulfide veined-interspersed ores probably in the marginal part of the porphyry or, according to other data, HMS system is spatial, not temporal. The formation of small inclusions of gold, silver, monazite and nasturane went along with the formation of interspersed and veined-interspersed sulfide ores – a product of circulation of solutions or fluids in the fractured massif of effusive rocks of volcanic construction. The genesis of scattered cassiterite and scheelite, judging by the peculiarities of its placement, is probably synchronous with propylitization in host volcanites containing sulfide inclusions, and is due to the proximity of objects specializing in tin and tungsten.

Keywords: Verkhnee-Zolotoe, Primorye, cassiterite, scheelite, monazite, nasturane, fluorite, gold, silver, fine inclusions

Acknowledgements: The author appreciates the N-Mining LLC for providing the opportunity to select a collection of samples in 2014 and expresses deep gratitude to the staff of the Department of Geology of Mineral Deposits of the Mining University, St. Petersburg, and the Resource Center for Microscopy and Microanalysis of the Scientific Park of St. Petersburg State University, where the research was conducted, to Elena G. Panova, Dr. Sc., Professor of the Department of Geochemistry of the Institute of Earth Sciences of St. Petersburg State University, for valuable consultations during the preparation of the text of this article.

For citation: Slastnikov V.V. Finely interspersed accessory and ore minerals of the Verkhnee-Zolotoe deposit. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 2, pp. 26–41. DOI: 10.18799/24131830/2025/2/4620

Введение

Медь является важным металлом для растущей обрабатывающей промышленности нашего государства. Потенциал Дальнего Востока России по добыче меди и сопутствующих полиметаллов высок, однако специализация региона на олове, вольфраме, золоте и серебре во многом обусловили малую изученность проявлений меди [1, 2]. Исследуемое месторождение медное, хотя для данной территории более типичны рудопроявления олова и вольфрама. Цель исследования – установить характер распределения тонковкрапленных акцессорных рудных минералов и их приуроченность к определённым ассоциациям сульфидов и метасоматическим изменениям.

Настоящая статья посвящена месторождению, чье геологическое строение было крайне слабо освещено в литературе: подавляющая часть информации о геологическом строении как месторождения Верхнее-Золотое, так и прилегающей территории, содержится в информационных отчетах геологических организаций. В [3] были описаны особенности взаимоотношений систем рудных прожилков и крупных разрывных нарушений; состав и взаимоотношения генераций минералов в прожилках, петрографический состав пород, вскрытых разведочным бурением в 2014 г.

Олово и вольфрам были отмечены в следовых количествах при химическом анализе керна в значимой доле проб. Однако описание керна и позже

исследование шлифов и аншлифов из рудных зон дало лишь несколько зёрен касситерита, много меньше, чем можно было ожидать по результатам валового химического анализа [3]. Данное расхождение могло быть объяснено либо нахождением олова и вольфрама в виде примесей в каких-либо минералах, либо выделением их фаз в виде тонкой вкрапленности, не фиксируемой невооружённым глазом. Настоящая работа посвящена тонко вкрапленным рудным и акцессорным минералам центральной части Верхнего-Золотого. Исследование тонкой вкрапленности рудных минералов позволит специалистам-геологам, работающим на этом многообещающем объекте, иметь в руках инструмент для лучшего понимания результатов валовых химических анализов руд и увязки их с результатами документации керна; точнее и экономичнее вести разведку на флангах месторождения; упростить задачу поиска сходных с Верхним-Золотым объектов на территории как Звездного рудного узла, так и Приморья.

Объект и методика исследования

Объект исследования локализован в Главном синклинии Сихотэ-Алиня и является составной частью Арму-Именной структурно-фациальной подзоны [2, 4] (рис. 1). Площадь месторождения принадлежит Журавлевско-Амурскому террейну [2], терригенные породы которого слагают нижний структурный этаж. Верхний, рудовмещающий, структурный этаж – вулканический конус, сложенный туфами, туффитами, лавами преимущественно среднего состава, относимым к Синанчинскому комплексу сеноманского возраста (по [5–8] – верхнедальнинская толща альбского возраста, рис. 2). Особенностью пород данного комплекса является высокое содержание лантаноидов, по геохимическим характеристикам они соответствуют комплексам активных континентальных окраин и островных дуг: надсубдукционным вулканитам известково-щелочного ряда, сформированным на континентальной окраине андийского типа [2]. Это позволяет отдать предпочтение гипотезе накопления пород верхнедальнинской толщи в надсубдукционной обстановке, близкой к таковой в Андах [5, 6], нежели рифтовой сдвигово-раздвигового типа [2].

По итогам работ 1990–1994 гг. месторождение Верхнее-Золотое было отнесено к типу комплексных олово-меднопорфировых месторождений, позже оно было отнесено к медно-колчеданному типу. В рамках проводимого исследования мы принимаем во внимание эволюцию представлений о промышленном типе объекта изучения – она маркирует сложность геологического строения месторождения, указывает на наличие в его структуре черт, присущих обоим предложенным промышленным типам.

Вопрос о минеральном составе руд месторождения не относится к теме настоящей статьи, однако его освещение поможет понять причины эволюции представлений о его генезисе. К сожалению, информация о месторождении на всём протяжении истории его открытия и разведки аккумулировалась в производственных отчётах и вследствие этого крайне слабо вовлечена в научный оборот. Приведём информацию о составе руд месторождения по состоянию на 2014 г., когда автор работал на тогда рудопроявлении на позиции ведущего геолога с уточнениями по результатам исследования коллекции аншлифов.

Всего в рудах центральной части месторождения было установлено более 20 рудных минералов. Основными являются халькопирит и самородное серебро, второстепенные – пирит, сфалерит, арсенопирит, галенит, марказит. Крайне редки находки минералов вольфрама, олова и висмута – вольфрамит, касситерита, станнина, висмутит. Ассоциация зоны окисления рудных тел включает, соответственно, фазы с большей степенью окисления металлов и содержащие воду: лимонит, скородит, реже малахит, англезит, смитсонит и каолин.

Большая часть руд представлена ассоциацией халькопирита и подчинённых количеств сфалерита и пирита. Для руд типичны прожилковые, гнездовые, вкрапленные, прожилково-вкрапленные текстуры. Ассоциации сфалерита, пирита и галенита формируют схожие текстуры, однако менее распространены. Рудные содержания арсенопирита связаны с зонами метасоматического окварцевания и центральными частями зон повышенной трещиноватости.

Пирит является составной частью как ранних ассоциаций, к которым относятся халькопиритовые руды, так и более поздних, наложенных на них, представленных преимущественно кварц-карбонатными прожилками с пиритом и марказитом.

Выделено шесть крупных рудовмещающих структур северо-западного простираения, подразделяемых на отдельные малые рудные зоны, соответствующие отдельным зонам прожилкования или развития вкрапленного оруденения.

Таким образом, на стадиях поиска, оценки и разведки Верхнее-Золотое за счёт его локализации в пределах древнего вулканического конуса и состава, а также структурно-текстурных особенностей руд можно было интерпретировать либо как краевую часть порфировой системы, либо как колчеданную с весьма диссипированными рудами. Основной проблемой попыток отнесения рудопроявления к порфировому типу стала безуспешность поиска собственно штока с сульфидным оруденением.

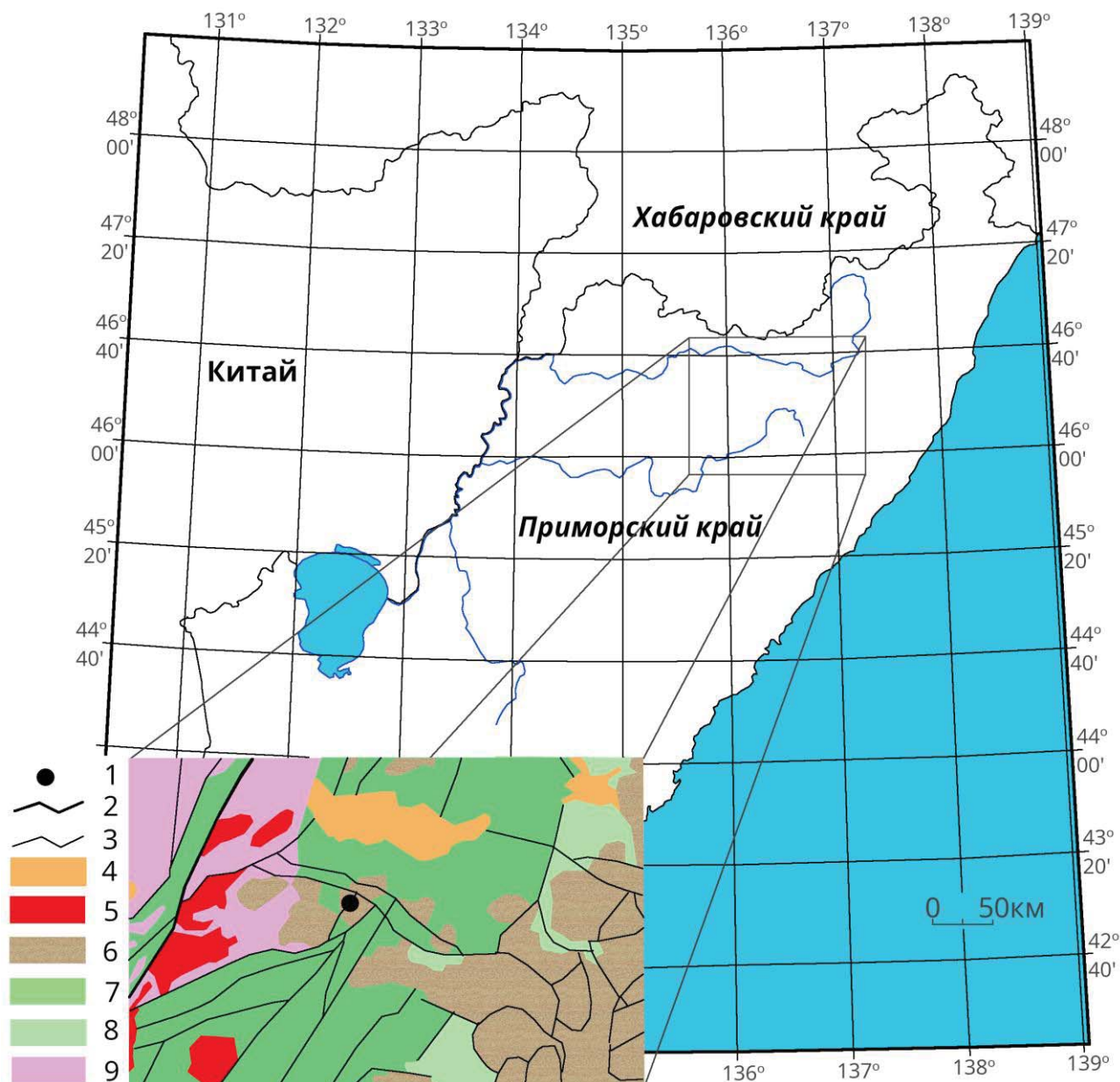


Рис. 1. Региональная позиция месторождения. Тектоническая схема региона в радиусе около 150 км от месторождения Верхнее-Золотое, масштаб 1:2500000: фрагмент [2, 7]. Условные обозначения: 1 – Звёздный рудный узел; разрывные нарушения: 2 – региональные, 3 – крупные; 4 – кайнозойские песчано-алевролитовый угленосный, молассовый и платобазальтовый структурно-вещественные комплексы; 5 – гранитовый и гранодиорит-гранитовый структурно-вещественные комплексы раннемелового возраста; 6 – позднемеловые, палеогеновые и неогеновые вулканогенные и интрузивные структурно-вещественные комплексы Восточно-Сихотэ-Алинского окраинно-континентального вулканического пояса; геодинамические комплексы зрелых островных дуг: 7 – берриас-валанжинские и готерив-альбские песчано-алевролитовые структурно-вещественные комплексы задугового бассейна; 8 – апт-альбские вулканогенные, вулканогенно-терригенные и флишоподобные структурно-вещественные комплексы островной дуги; 9 – олистостромовый и алеврит-песчаниковый структурно-вещественные комплексы юрского возраста

Fig. 1. Regional position of the deposit. Tectonic scheme of the region within a radius of about 150 km from the Verkhnee-Zolotoe deposit, scale 1:2500000: fragment [2, 7]. Symbols: 1 – Zvezdny ore node; faults: 2 – regional, 3 – large; 4 – Cenozoic sand-siltstone coal-bearing, molasse and platobasalt structural-material complexes; 5 – granite and granodiorite-granite structural-material complexes of Early Cretaceous age; 6 – Late Cretaceous, Paleogene and Neogene volcanogenic and intrusive structural-material complexes of the East Sikhote-Alin marginal continental volcanic belt; geodynamic complexes of mature island arcs: 7 – Berriasian-Valanginian and Goteriv-Albian sand-siltstone structural-material complexes of the back arc basin; 8 – Apt-Albian volcanogenic, volcanic-terrigenous and flyschoid structural-material complexes of the island arc; 9 – olistostromic and siltstone-sandstone structural-material complexes of Jurassic age

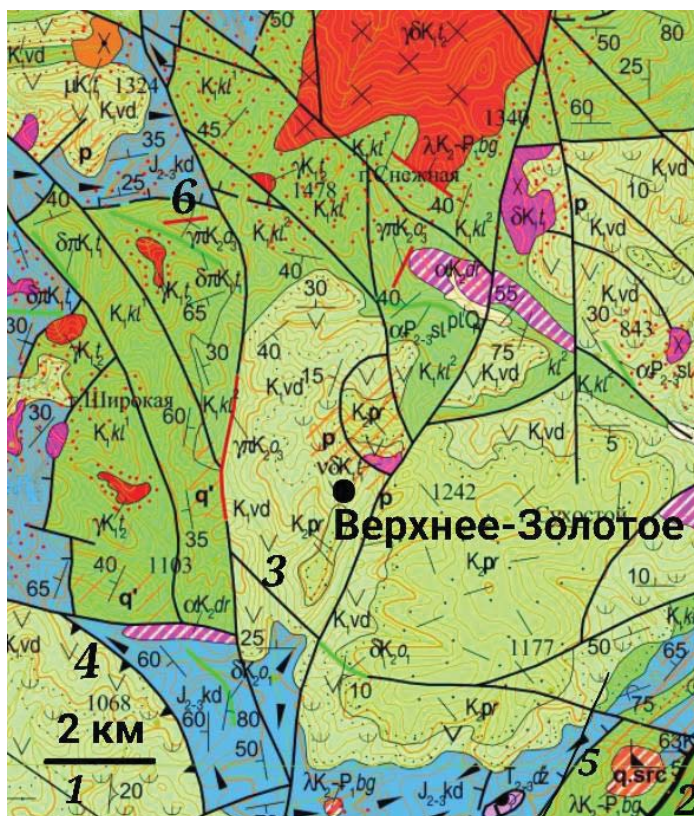


Рис. 2. Геологическая карта окрестностей месторождения Верхнее-Золотое масштаба 1:200000 [8]. Условные обозначения: Юра средняя-поздняя: J2-zkd – кададинская толща, терригенные отложения, аллоолистоостромы. Мел ранний: K1kl1 – ключевская свита первая толща, терригенные отложения; K1kl2 – ключевская свита вторая толща, терригенные отложения; K1vd – верхнедальненская толща, вулканиты среднего и кислого состава; комагматы: βK1vd – субвулканические массивы андезитов, дацитов; ζK1vd – субвулканические массивы риолитов; татибинский гранит-диоритовый плутонический комплекс, первая фаза: δpK1t1 – дайки диорит-порфиринов, вторая фаза: γK1t2 – интрузии гранитов, δK1t2 – интрузии диоритов. Мел поздний: γpK2o3 – олгинский гранитный плутонический комплекс, третья фаза, дайковые тела гранит-порфиров. Эоцен: P2-3sl – салибесский комплекс базальтовый вулканический, дайковые тела базальтов. Границы: 1 – геологическая достоверная; разрывные нарушения: 2 – надвиги достоверные главные, 3 – неустановленной кинематики, 4 – разломные границы вулcano-тектонических структур достоверные, 5 – надвиги достоверные, 6 – надвиги достоверные, не выходящие на картографируемую поверхность. Метасоматические изменения: q' – окварцеванные породы; p' – пропилитизированные породы; q.src – кварц-серцитовые изменения

Fig. 2. Geological map of Verkhnee-Zolotoe deposit and adjacent areas. Scale 1:200000 [8]. Signed on the map: Jurassic, medium and later: J2-zkd – kadadinskaya rock mass, terrygenic rocks in alloolystostromes. Cretaceous, early: K1kl1 – kluchevskaya series, first rock mass, terrygenic; K1kl2 – kluchevskaya series, second rock mass, terrygenic; K1vd – verkhnedalninskaya rock mass, volcanic rocks of andesitic to rhyolitic composition; comagmates: βK1vd – subvolcanic andesite and dacite bodies; ζK1vd – subvolcanic rhyolitic bodies; tatibinsky granite-diorite plutonic complex, first phase: δpK1t1 – porphyry diorite dykes, second phase: γK1t2 – granite intrusive bodies, δK1t2 – diorite intrusive bodies. Cretaceous, elder: γpK2o3 – olginsky granite plutonic complex, third phase, granite-porphyrus dykes. Eocene: P2-3sl – slybese basaltic volcanic complex, basaltic dykes. Borders: 1 – geological proven; faults: 2 – reverse fault main and proven, 3 – fault of unknown kinematics, 4 – fault borders of volcano-tectonic structures, proven; 5 – reverse fault proven, 6 – reverse fault proven, not reaching mapped surface. Metasomatic alterations: q' – quartz altered rocks; p' – propylitized rocks; q.src – quartz-serizite metasomatic rock

В настоящее время гипотеза о колчеданной природе оруденения принята при защите запасов месторождения (реестровый номер протокола в Едином фонде геологической информации 43778524). Всего на баланс поставлено меди более 300 тыс. т и серебра более 600 т.

Компанией N-Mining LLC в 2014 г. были предоставлены для изучения коллекция из 32 готовых про-

зрачных шлифов и дана возможность отбора каменного материала из архивных половинок керна. Всего исследовано 70 шлифов (полный охват всех 11 скважин, 1–15 шлифов на скважину) и 38 аншлифов (четыре наиболее интересных скважины, 1–5 аншлифов на скважину). Изучение тонко вкрапленных минералов методом сканирующей электронной микроскопии было выполнено для всех аншлифов.

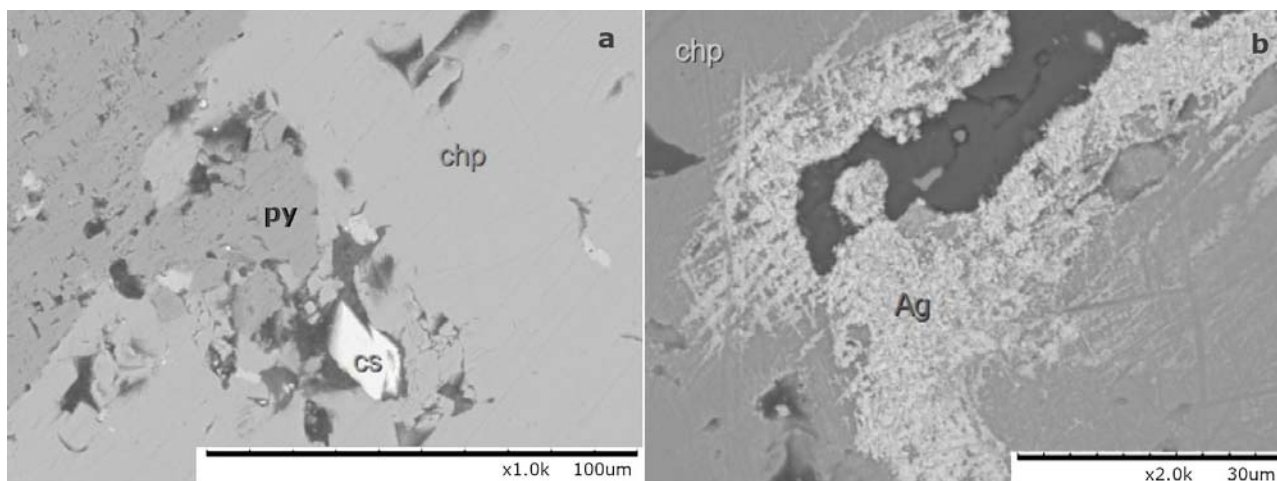


Рис. 3. а) идиоморфный касситерит (cs) в ксеноморфном халькопирите (chp), образующем тесное срастание с ксеноморфными пиритом (py); б) дендриты серебра (Ag) в ксеноморфном халькопирите (chp)
Fig. 3. а) idiomorphic cassiterite (cs) in xenomorphic chalcopyrite (chp), forming a close fusion with xenomorphic pyrite (py); б) silver dendrites (Ag) in xenomorphic chalcopyrite (chp)

Исследование проведено с использованием сканирующего электронного микроскопа Hitachi TM3000 с приставкой энергодисперсионного анализа OXFORD (далее – микрозонд). Основной решаемой с использованием данного оборудования задачей было диагностирование минерального состава тонкой рудной вкрапленности. Проведена съёмка 797 микрозондовых точечных спектров с последующим расчётом химических формул минеральных фаз. Изученные пары шлиф/аншлиф были сгруппированы по глубине отбора керновой пробы, пересчитанной в абсолютную высотную отметку по глубине отбора керна и инклинометрии.

Результаты исследования и их обсуждение

Исследование коллекции аншлифов на сканирующем электронном микроскопе позволило выделить ряд акцессорных тонко вкрапленных минералов: касситерит, шеелит, самородное серебро и самородное золото, циркон, настуран и флюорит с примесью редких земель. *Касситерит* образует дисперсную вкрапленность в прожилках и породе на абсолютных отметках около 800 м в западной части площади бурения 2014 г. Кристаллы ксеноморфные, размер – первые десятки микрометров (рис. 3, а). Касситерит-содержащими являются кварцевые прожилки с пирит-халькопиритовой рудной минерализацией, кальцит-кварцевые прожилки с пирит-халькопирит-арсенопиритовой рудной минерализацией. В последних кроме касситерита были описаны единичные гипидиоморфные зерна *шеелита* в кальците и отдельные кристаллы содержащего редкие земли *флюорита*. В метасоматите кварц-серицитового состава по туфу псаммитовому андезитового состава касситерит вместе с

самородным серебром представлен единичными идиоморфными вкраплениями в халькопирите.

Самородное серебро описано в метасоматитах кислого состава по туфам с наложенной сульфидной минерализацией в центре месторождения на абсолютных отметках от 800 до 1000 м в ассоциации с халькопиритом и сфалеритом – дендриты серебра образуют структуры вставания в раздробленном кристалле халькопирита (рис. 3, б), тонкую вкрапленность ксеноморфных кристаллов диаметром до 10 мкм в породе с пиритом, халькопиритом, галенитом и монацитом, в виде примеси в галените (рис. 4, а). *Самородное золото* описано в зальбанде кварцевого прожилка в единичном ксеноморфном вкраплении в пирите, центральная часть месторождения, абс. отм. 1136,6 м. Размер включения составляет первые микрометры. Сульфидная минерализация в данном аншлифе отлична от типичной для месторождения пирит-халькопиритовой, представлена пиритом, реальгаром и пирротинном. *Монацит* представлен редкими гипидиоморфными вкраплениями в метасоматитах кислого состава в образце с запада центральной части месторождения. Ассоциирует с пирит-халькопиритовой сульфидной минерализацией и настураном. В состав минерала входят церий и неодим в соотношении 2 к 1, или один атом церия заменен на лантан, и расчётная формула соответствует $(\text{Ce}, \text{La}, \text{Nd})(\text{PO}_4)_3$. Размер вкрапленников измеряется десятками долями миллиметра, степень идиоморфизма весьма высокая. *Циркон* представлен единичными кристаллами микронного размера в метасоматитах кислого состава. Степень идиоморфизма зёрен колеблется от высокой до низкой. Ассоциирует с пиритом.

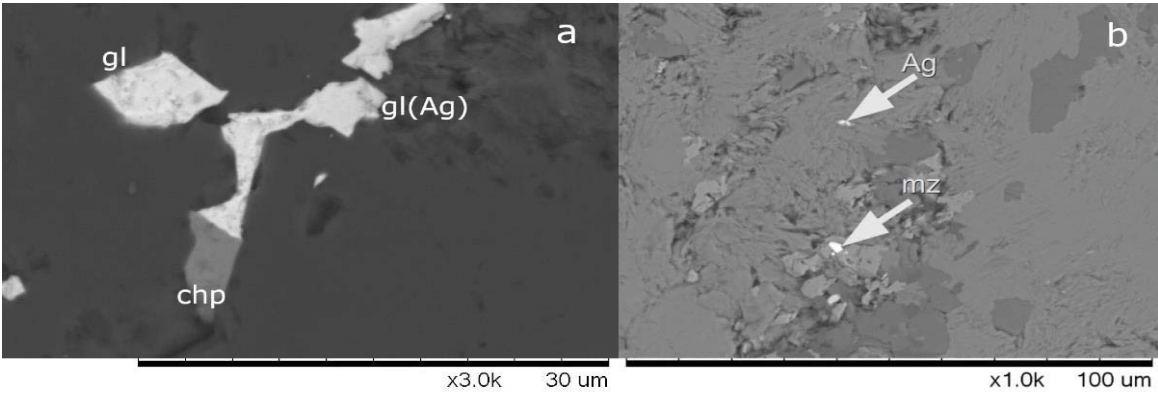


Рис. 4. а) гипидиоморфный галенит (gl) с примесью серебра (gl(Ag)) с ксеноморфным халькопиритом (chp) в метасоматическом кварце; б) самородное серебро (Ag) с ксеноморфным монацитом (mz) в агрегате метасоматического серицита и кварца
Fig. 4. a) hypidiomorphic galena (gl) with an admixture of silver (gl(Ag)) with xenomorphic chalcopyrite (chp) in metasomatic quartz; b) native silver (Ag) with xenomorphic monazite (mz) in an aggregate of metasomatic sericite and quartz

Настуран представлен редкой вкрапленностью гипидиоморфных и ксеноморфных зёрен микронного размера в интерстициях в метасоматическом кварце в центральной части месторождения. Настуран ассоциирует с кальцитом в составе прожилков – с монацитом, флюоритом и пиритом. Флюорит с примесью редких земель – церия, ниобия, лантана ассоциирует с монацитом и пирит-халькопиритовой минерализацией в кислых метасоматитах. Однако меньший размер вкрапленников

(до первых микрометров), меньшая степень идиоморфизма, вместе с локализацией его кристаллов в интерстициях метасоматического матрикса указывает на более позднее его образование по сравнению с монацитом.

Особенности сульфидной минерализации были описаны в [3]. Ассоциации сульфидов и приуроченность их к определённым фациям метасоматоза и мотиву размещения в породе или прожилке показаны в табл. 1.

Таблица 1. Ассоциации сульфидов с акцессорными тонковкрапленными минералами

Table 1. Sulfide associations with fine disseminated accessory minerals

Сульфид Sulfide	Сульфидная ассоциация Sulfide association										Акцессорный минерал Accessory mineral	Приуроченность к ас- социации сульфидов Confinedness to a sulfide association	Метасоматические изменения Metasomatic alterations	Вкрапленность Dissemination
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10				
Пирит Pyrite	+	+	+	+	+	+	+	+			Серебро самородное Native silver	1, 7, 8, 10	Хлорит-серицит- кварцевые, серицит- кварцевые Chlorite-sericite-quartz, sericite-quartz	В породе In host rock
Халькопирит Chalcopyrite					+	+	+	+	+	+	Золото самородное Native gold	3	Серицит-кварцевые Sericite-quartz	
Сфалерит Sphalerite								+	+	+	Настуран Nasturan	3, 7		В породе и про- жилках In host rock and veinlents
Арсенопирит Arsenopyrite						+			+	+	Флюорит Fluorite	4, 6, 9		
Галенит Galena		+			+			+	+		Касситерит Cassiterite	4, 6, 10		
Пирротин Pyrrhotite			+							+	Шеелит Scheelite	6		В породе In host rock
Реальгар Realgar			+								Монацит Monazite	3, 4, 7		
Кубанит Cubanite					+						Циркон Zircon	1, 2, 4, 5	Хлорит-серицит- кварцевые Chlorite-sericite-quartz	

Полиметаллическое сульфидное оруденение в изученной части месторождения размещено в собственно толще стратифицированной вулканической постройки, что маргинально для модели порфировой системы по [9], но хорошо соотносится с более широкой моделью порфировой системы, предложенной в [10], по которой исследованная нами часть месторождения является краевой частью медно-порфировой системы с вкрапленным и прожилково-вкрапленным оруденением. Отметим, что вопрос типичности территории юга Хабаровского края и Приморья для образования порфировых месторождений является дискуссионным [11, 12], в условиях вулканической активности структура месторождения и его тип, соответственно, могут быть обусловлены только циркуляцией рудогенерирующего флюида. Последнее определило существенно большее соответствие исследуемого объекта колчеданному типу, чем части порфировой системы, пусть и краевой.

Исследованные рудовмещающие вулканы нанчинского комплекса практически нацело затронуты метасоматическими изменениями фаций пропилитов и вторичных кварцитов – региональной и локальной соответственно. Пропилитизация проявлена во всех исследованных образцах вулкаников в виде развития тонкозернистого хлорита или агрегата тонкозернистого эпидота и серицита, реже скрытокристаллических хлорита, серицита и кварца по всей массе породы. Степень пропилитизации преимущественно средняя (20–80 % об.), реже малая или полная. Кислотный метасоматоз предположительно фации вторичных кварцитов, проявленный в развитии агрегатов тонкозернистого кварца и серицита, наложен на пропилитизированные участки пород. Последним по времени, о чём позволяет судить степень идиоморфности кристаллов, на рудовмещающие породы наложено образование мелко-среднекристаллических агрегатов идиоморфного кальцита, связанного с поздним пострудным карбонатным и карбонат-кварцевым прожилкованием. Очередность проявлений различных стадий метасоматоза – от начальной стадии к продвинутой: пропилитизация (эпидот, хлорит, серицит), окварцевание и серицитизация (серицит, кварц-1), окварцевание прожилковое (кварц-2), карбонатизация (кальцит).

Приуроченность образования рудных и жильных минералов к стадиям метасоматических изменений была получена по результатам исследования идиоморфности отдельных кристаллов рудных фаз и их взаимоотношений с агрегатами вмещающих фаз и базируется на результатах предыдущих исследований, изложенных в [3]. Последовательность метасоматических процессов и приуроченность к ним сульфидной минерализации по результатам проведённого исследования методами оптической

и электронной сканирующей микроскопии следующая: пропилитизация (стадия 1): пирит метасоматический, касситерит, шеелит; серицитизация и окварцевание (стадия 2): пирит метасоматический, пирит прожилковый, халькопирит, галенит, сфалерит, арсенопирит, реальгар, пирротин, пентландит, кубанит, киноварь, серебро и золото самородные, настуран, флюорит, монацит; карбонатизация (стадия 3): пирит метасоматический; циркон, по всей видимости, образован в дометасоматический этап.

Ассоциация рудных минералов, связываемая нами с процессами пропилитизации, т. н. стадия 1, вкраплена во вмещающих оруденение прочих стадий пропилитах по вулканикам среднего и, реже, кислого состава. Вкрапленная и прожилково-вкрапленная рудная и акцессорная минерализация (стадия 2) фиксируется в кварцевых, кварц-карбонатных прожилках, их зальбандах, зонах кварц-серицитовых изменений по вмещающим породам. Очередность образования агрегатов хорошо фиксируется по замещениям ассоциации ткани, сложенной плотной массой минералов группы хлорита на серицит и кварц метасоматического (бластез) или жильного генезиса. Выделить часть вкрапленного, преимущественно в прожилках, пирита в третью стадию позволил его существенно больший идиоморфизм, по сравнению с входящим в сульфидную ассоциацию, и размещение преимущественно в осевой части прожилков, что позволяет предполагать его рост в полости в условиях повторного открытия трещин/жил.

Температурные и барические условия для выделенных стадий приводятся по литературным данным. Проведение их лабораторного исследования планируется в будущем.

Ассоциация эпидота и хлорита по [13–16] низкотемпературная, от 200 до 350 °С, приповерхностная, до 2 км. Близкие глубинные условия по [14, 15] показаны для серицит-кварцевой ассоциации вторичных кварцитов – 1,5–2 км, температуры средние, от 250 до 500 °С.

Повсеместная пропилитизация с наложенными, пространственно приуроченными к кварцевому и сульфид-кварцевому прожилкованию окварцеванием и серицитизацией согласуется с развитием метасоматической проработки пород вулканической постройки трещинными растворами с вертикальным размахом глубин от первых десятков до первых тысяч метров [17, 18] в субаквальных условиях [19], надсубдукционных или надрифтовых вулканотектонических структурах [20], в которых, вероятно, сложное распределение малых интрузий [21]. Это привело к наложению процессов кислотного метасоматоза на пропилитизированный протолит и к отложению прожилково-вкрапленных и вкрапленных руд и субмикроскопических акцессориев (табл. 2).

Таблица 2. Парагенетическая схема. Составлена с использованием данных [3]

Table 2. Paragenetic scheme. Made with data from [3]

Метасоматический процесс Metasomatic process	Исходная порода Primary rock	Пропилитизация Propylitisation	Кварц-серицитовые изменения Quartz-sericitic alterations	
Прожилки Veinlets	Нет Absent	Биотитовые Biotite	Кварцевые с сульфидами Quartz with sulphides	Кварц-кальцитовые с сульфидами Quartz-calcite with sulphides
Стадия Stage	Дорудная Pre-ore	Дорудная Pre-ore	Рудная Ore	Пострудная Post-ore
Циркон Zircon				
Настуран Nasturane				
Пирит Pyrite				
Золото самородное Native gold				
Серебро самородное Native silver				
Флюорит Fluorite				
Монацит Monazite				
Касситерит Cassiterite				
Шеелит Sheelite				
Пирротин Pyrrhotite				
Кубанит Cubanite				
Халькопирит Chalcopyrite				
Сфалерит Sphalerite				
Арсенопирит Arsenopyrite				
Галенит Galena				
Реальгар Realgar				

Исследование тонкозернистых агрегатов рудных сульфидов показало, что они являются частью более крупной рудной вкрапленности в прожилках и вмещающей породе. Тонкая вкрапленность была нами описана для всех макроскопически определяемых сульфидов: пирита, халькопирита, сфалерита, галенита, арсенопирита. Отметим особо, что для халькопирита характерно образование в виде тонкой микронной вкрапленности в сфалерите. Наиболее редкие, встреченные в единичных образцах в редких зёрнах реальгар, пирротин, пентландит, кубанит и киноварь описаны только в виде тонкой рассеянной вкрапленности. Также отметим, что как для практически «сквозного» для всех стадий развития рудной системы пирита, так и основных рудных сульфидов – халькопирита, галенита, сфалерита, арсенопирита – весьма вероятно частичное переотложение в пострудный этап (табл. 2).

Образование касситерита месторождения Верхнее-Золотое отнесено нами к первой стадии метасоматических изменений – площадной пропилитизации толщи вулканитов. Однако прямо утвер-

ждать это не позволяет высокая степень наложенных кварц-серицитовых изменений второй стадии (табл. 1), отмеченных во всех образцах с касситеритом. В пользу предлагаемой гипотезы генезиса последнего говорит то, что, условия образования касситерита касситерит-силикатной формации, к которой наиболее близко Верхнее-Золотое, более окислительные, чем касситерит-кварцевой [22], что хорошо согласуется с общим кислотным характером вторичных изменений.

Синхронная с хлоритизацией кристаллизация касситерита и наличие зон касситеритовых руд с низкими содержаниями сульфидов на оловорудных объектах Приморья были отмечены в [22–24]. Следующей, принятой во внимание, особенностью является высокая устойчивость касситерита к внешним воздействиям [25, 26], что позволяет предполагать возможность сохранения касситерита после прохождения кислотного метасоматоза. Единичные находки срастаний касситерита и галенита в кварцевом прожилке (рис. 4) указывают на возможность переотложения имеющегося или отложения

нового касситерита во второй, рудный, этап. Ассоциация минералов олова и вольфрама типична для Арминского рудного района Приморья (олово), в который входит Звёздный рудный узел. Для рудного района характерно расположение месторождений вольфрама (Восток-2, около 40 км к востоку от месторождения Верхнее-Золотое), олова и вольфрама, к примеру, Тигриное (около 50 км к юго-востоку от исследуемого месторождения) в восточной части рудного района, олова – в центральной и западной частях рудного района, олова и меди – на севере рудного района, где расположено месторождение Верхнее-Золотое. Общим между изучаемым месторождением и оловорудными объектами является наличие на последних медной сульфидной минерализации, сопутствующей оловянной. К примеру, на месторождениях Арсеньевское и Искра (Кавалеровский рудный район). Близки и вмещающие рудные жилы, переработанные в ходе кислотного метасоматоза вулканиты. Временной интервал формирования месторождений олова Приморья оценивается в промежутке от 92 до 45 млн лет и соответствует возможному времени становления месторождения Верхнее-Золотое [10, 24, 27].

Генезис рудогенерирующего флюида для оловорудных объектов Приморья может быть связан с расположенными в непосредственной близости от них интрузиями кислого состава, в то время как вмещающие оруденение вулcano-плутонические структуры в большой степени изолированы друг от друга [27, 28]. Это приводит к дискуссионности вопроса об источнике вольфрама и олова на исследуемом месторождении: в радиусе первых километров отмечены несколько малых интрузий кислого состава, а субширотная зона развития контактовых роговиков к северу от месторождения указывает на наличие «слепого» батолита. Разрешить поставленный вопрос можно в рамках будущего исследования, установив состав рудогенерирующего флюида и связав его с определённым магматическим телом методами исследования состава флюидных и расплавных включений, как было выполнено для грейзенов месторождения Тигриное [29], методом LA-ICP-MS после детального петрографического изучения олово-сульфидных руд с выходом на влияние вторичных изменений на состав рудных минералов [30] или комбинацией более доступных ICP-MS / ICP-OS / MC-ICP-MS и U-Pb датирования по цирконам, как было сделано для практически синхронных гранитов Центрального Китая [31].

Сходно с касситеритом и шеелитом размещение циркона: он в крайне близких количествах встречен нами как в пропилитизированной породе, так и во вторичных кварцитах (табл. 2), однако, как было указано выше, вероятно, сингенетичен протолиту,

ассоциирует с пиритом, по всей видимости, метасоматического генезиса. Единичный его кристалл, найденный в кварцевом прожилке, вероятно, был захвачен с ксенолитом породы, полностью растворённым в процессе кристаллизации минерального агрегата прожилка. Отметим, что вопрос о времени образования описанного циркона требует проведения дальнейшего исследования: вариативность идиоморфизма его кристаллов позволяет предполагать дометасоматический возраст для наиболее идиоморфных пылеватых кристаллов, по всей видимости, не затронутых при метасоматической переработке породы, и частичное растворение с перетолжением вещества для менее идиоморфных, образующих тесные срастания с породообразующими силикатами.

Самородные серебро и золото ассоциируют с сульфидами: серебро с пиритом, халькопиритом, сфалеритом и арсенопиритом, золото с пиритом и арсенопиритом. Примечательна форма выделения серебра: скелетные кристаллы. Вростки их в арсенопирите хорошо маркируют одновременность их образования. Следует отметить, что ассоциация «пустого», вероятно, метасоматического пирита во вмещающей ассоциацию вкрапленных халькопирита, сфалерита, галенита и, в некоторых образцах, арсенопирита породе указывает на то, что исследованные образцы отобраны в субэпитермальной зоне прожилкования [9, 32–34], которая может соответствовать как краевой части порфировой системы, так и зоны развития прожилкововкрапленного колчеданного оруденения. Последним может быть объяснено крайне малое для порфировой системы количество благородных металлов. Нахождение самородного золота и серебра в виде вкрапленности во вмещающей породе, но не в прожилках, позволяет заключить, что воздействие содержащего их флюида или раствора на вмещающие кислые метасоматиты по туфам среднего состава было длительным и глубоким. На то же указывают «смазанные» границы прожилков [34].

Примечательно выделение золота в самородном виде, а не в составе сульфидов, как можно было ожидать по [12, 35, 36]: микрозондовые анализы химического состава сульфидов (72 % от общего количества) не показали вхождения золота в их состав. Это указывает на его транспортирование флюидом [37] и отложение отдельно от сульфидной минерализации.

Минералы редких земель – флюорит и монацит, равно как и касситерит, отмечены в метасоматитах с вкрапленной медной минерализацией. Размещение пылеватых кристаллов перечисленных выше минералов в интерстициях преимущественно ксеноморфных зёрен ткани метасоматита указывает на образование флюорита, монацита, касситерита на

заклучительной стадии кислотного метасоматического процесса рудной и, возможно, начала пострудной стадии (табл. 2).

Порфиновые системы, относящиеся к различным регионам и обстановкам [38], к примеру, медно-молибденовая месторождения Los Sulfatos (Чили) [18], провинция Morococha (Перу) [39] медно-золоторудная с молибденом месторождения Vahti (Греция) [40], медно-золоторудная месторождения Малмыж (РФ, Хабаровский край) [41], демонстрируют наличие редкоземельных элементов как в составе сульфидной и оксидной рудной минерализации, так и собственно минералов редких земель, как и Верхнее-Золотое.

Флюорит является одним из типичных поздних нерудных минералов эпitherмальных систем на периферии порфировой системы. Обогащение флюорита редкоземельными элементами в данном случае указывает лишь на наличие редких земель в материнском флюиде [38, 42–44].

Вопрос об источнике редкоземельных элементов в пылеватом флюорите требует проведения дополнительного исследования ввиду недостаточности данных в изученной выборке, однако мы предполагаем, что таким источником стал монацит: флюорит является наиболее низкотемпературным и наименее стойким в описанной ассоциации [42, 43, 45]. Вероятно его образование при позднейшей гидротермальной проработке вмещающей породы с инкорпорированием продуктов растворения монацита.

Урановая же минерализация, представленная настураном, в свою очередь, отмечена как в кварцевых прожилках, так и во вмещающих медно-полиметаллическое оруденение метасоматитах, что согласуется с литературными данными [46, 47]. Ассоциированность настурана с монацитом и благородными металлами позволяет сделать вывод об участии весьма кислого рудогенерирующего флюида в формировании порфировой системы на одном из этапов. Редкость находок и сугубо аксессуарный характер этой ассоциации указывают на её обособленность от собственно рудной сульфидной.

Заключение

Для олова, вольфрама и циркония на изучаемом месторождении характерно наличие собственных фаз при полном «игнорировании» вхождения в состав сульфидов в качестве примесей. Ассоциация с рудными сульфидами, характерными для эпitherмального краевого штокверка, вероятно, порфировой системы, – халькопиритом, галенитом, сфалеритом [9, 32–34], является для вышеупомянутых фаз пространственной, но не временной. На основании результатов проведённого исследования предлагаем следующую гипотезу очередности кри-

сталлизации тонко вкрапленных аксессуарных минералов.

Циркон – наиболее древний аксессуар, вероятно, образовавшийся ещё на стадии формирования эффузивно-осадочной вмещающей породы, чему не противоречат микронный размер кристаллов и их слабо выраженная огранка, трактуемые нами как результат быстрой кристаллизации при эффузивном процессе. Касситерит и шеелит, являющиеся «сквозными» минералами для всего Звёздного рудного узла, приурочены к площадным процессам эпидотизации и хлоритизации первой стадии метасоматических изменений. Следовые их количества указывают на то, что оловянная и вольфрамовая минерализация на изученной части месторождения Верхнее-Золотое обусловлена общими для Звёздного рудного узла и содержащей месторождение вулканотектонической структуры в частности процессами, локальная интенсификация которых сформировала территориально близкие месторождения Звёздное и Янтарное. Образование тонкой вкрапленности аксессуарного золота, серебра, монацита и настурана, флюорита, вероятно, обусловлено процессом циркуляции кислого флюида на второй стадии метасоматических изменений, маркируемой локальной околосильной и околотрепчинной серицитизацией, окварцеванием. Приуроченность полиметаллической сульфидной минерализации также к данной стадии и наличие взаимных вростаний исследованных аксессуаров и рудных сульфидов, что трактуется как признак синхронности их кристаллизации, позволяет отнести образование золота, серебра, монацита и настурана, возможно, флюорита к рудной стадии становления собственно системы рудных прожилков, порфировой или субаквальной [19, 48]. Образование пылеватой вкрапленности флюорита могло проходить и на более поздней, эпitherмальной стадии карбонатизации (стадия 3). Последнее может объяснить захват им примеси редкоземельных металлов: они могли быть высвобождены при разрушении части образованного на предыдущей стадии монацита. Вкрапленность же касситерита и шеелита, судя по особенностям её размещения, вероятно, синхронна площадным метасоматическим изменениям в толще вмещающих сульфидную вкрапленность вулканитов среднего состава и обусловлена близостью месторождений и рудопроявлений с олово-вольфрамовым оруденением.

Самородные благородные металлы ассоциируют с пиритом, пирротинотом (серебро и золото), арсенопиритом и халькопиритом, сфалеритом (серебро) – такая ассоциация известна по среднетемпературным полиметаллическим золотоносным жилам, диапазон глубин и температур образования которых пересекается с таковыми для вторичных квар-

цитов [14, 15]. Ассоциация арсенопирита и пирротина представляет редкость для изученной части месторождения (менее 1 % из описанных интервалов по керну), что указывает на локальность и, возможно, одноактность её появления. Приуроченность рудной сульфидной минерализации к участкам пород, в той или иной степени серицитизированных и окварцованных, пронизанных кварцевыми, сульфид-кварцевыми прожилками, указывает на её вероятную приуроченность к процессам кислотного выщелачивания. Можно выделить минимум две ассоциации: благороднометалльную – пирит-пирротиную с арсенопиритом и полиметаллическую — пирит-сфалерит-халькопиритовую. Более дробное выделение ассоциаций возможно на основе исследования массива данных документа-

ции керновых проб и результатов их химического анализа, что возможно в будущем.

Результаты проведённого исследования позволяют с достаточной степенью уверенности выдвинуть гипотезу образования сульфидных руд на исследованной части месторождения Верхнее-Золотое в ходе многоактной прокачки рудогенерирующего флюида по нескольким системам трещин с образованием прожилково-вкрапленного оруденения в породах вулканического конуса вулканотектонической структуры, вероятно, в островодужной обстановке [19]. Подтверждение предложенной гипотезы требует продолжения исследований рудных и акцессорных минералов месторождения Верхнее-Золотое.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Архипов Г.Н. Экономическое значение рудных минеральных ресурсов в Дальневосточном регионе // ГИАБ. – 2013. – № 1. – С. 270–276. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ekonomicheskoe-znachenie-rudnyh-mineralnyh-resursov-v-dalnevostochnom-regione> (дата обращения: 22.02.2024).
2. Геодинамика, магматизм и металлогения Востока России: в 2 кн. / под ред. А.И. Ханчука. – Владивосток: Дальнаука, 2006. – Кн. 1, 2. – 981 с.
3. Сластников В.В. Минерагенический тип рудопоявления Верхнее-Золотое: результаты петрографического исследования // ГИАБ. – 2016. – № 10. – С. 283–303.
4. Кемкин И.В. Геодинамическая эволюция Сихотэ-Алиня и Япономорского региона в мезозое. – М.: Наука, 2006. – 258 с.
5. Давыдова М.Ю., Мартынов Ю.А., Перепелов А.Б. Эволюция изотопно-геохимического состава пород вулкана Уксичан (Срединный хребет, Камчатка) и ее связь с неогеновой тектонической перестройкой Камчатки // Петрология. – 2019. – Т. 27. – № 3. – С. 282–307. DOI: 10.31857/S0869-5903273282-307.
6. Magnetotelluric study in the Los Lagos Region (Chile) to investigate volcano-tectonic processes in the Southern Andes / M.J. Segovia, D. Diaz, K. Slezak, F. Zuniga // Earth, Planets and Space. – 2021. – Vol. 73:5. – 14 p. DOI: 10.1186/s40623-020-01332-w.
7. Ханчук А.И., Иванов В.В. Мезо-кайнозойские геодинамические обстановки и золотое оруденение Дальнего Востока России // Геология и геофизика. – 1999. – Т. 40. – № 11. – С. 1635–1645.
8. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Лист L-53-XVII. Масштаб 1:200000. Геологическая карта / под ред. А.В. Лызганова. – СПб: Изд-во ФГБУ "ВСЕГЕИ", 2019. – 2 л.
9. Sillitoe R.H. Porphyry copper systems // Economic geology. – 2010. – Vol. 105. – P. 3–41. DOI: 10.2113/gsecongeo.105.1.3.
10. Lee C.-T. A., Tang M. How to make porphyry copper deposits // Earth and Planetary Science Letters. – 2020. – Vol. 529. – Iss. 115868. – P. 1–11. DOI: 10.1016/j.epsl.2019.115868.
11. Amphibole control on copper systematics in arcs: insights from the analysis of global datasets / N.D. Barber, M. Edmonds, F. Jenner, A. Audétat, H. Williams // Geochimica et Cosmochimica Acta. – 2021. – V. 307. – P. 192–211. DOI: 10.1016/j.gca.2021.05.034.
12. Zhao Y., Liu H., Qin K. Discussion on Au transportation mechanism in melt-magma-fluid in porphyry Cu deposit – a case study from Jinchang porphyry Au (Cu) deposit, Heilongjiang province, China // Ore Geology Reviews. – 2019. – Vol. 111. – Iss. 102968. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2019.102968. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0169136818305948?via%3Dihub> (дата обращения 27.02.2024).
13. Геохимия и петрография гидротермально измененных пород Рябинового рудного поля (южная Якутия) как основа прогноза золото-медно-порфирового оруденения / Н.В. Шатова, В.В. Шатов, А.В. Молчанов, О.В. Петров, А.В. Терехов, В.Н. Белова, В.И. Леонтьев // РГМ. – 2020. – № 84. – С. 71–96.
14. Дворник Г.П. Виды метасоматических пород: температурные условия образования, особенности состава, минерогения // Известия УГГУ. – 2020. – Вып. 1 (57). – С. 63–72. DOI: 10.21440/2307-2091-2020-1-63-72.
15. Трушин С.И., В Кириллов.Е., Лапенко А.С. Благороднометалльные рудные формации зон активизации востока Яно-Колымской складчатой системы (Магаданская область, Россия) // РГМ. Металлогения. – 2021. – № 85. – С. 67–78.
16. Ishikawa T. Some petrological considerations on the Miocene volcanic activities in green-tuff regions in Japan // Journal of the Faculty of Science, Hokkaido University. Geology and mineralogy. – 1960. – Ser. 4. – Vol. 10. – № 3. – P. 471–480.
17. Rapid alteration of fractured volcanic conduits beneath Mt Unzen / T.I. Yilmaz, F.B. Wadsworth, H. Al. Gilg, K.-U. Hess, J.E. Kendrick, P.A. Wallace, Y. Lavallée, J. Utley, J. Vasseur, S. Nakada, D.B. Dingwell // Bulletin of Volcanology. – 2021. – Vol. 83. – 14 p. DOI: 10.1007/s00445-021-01450-7.
18. Tracking cobalt, REE and gold from a porphyry-type deposit by LA-ICP-MS: a geological approach towards metal-selective mining in tailings / G. Velásquez, D. Carrizo, S. Salvi, I. Vela, M. Pablo, A. Pérez // Minerals. – 2020. – Vol. 10. – Iss. 109. – 17 p. DOI: 10.3390/min10020109.
19. Trace element signatures in pyrite and marcasite from Shallow Marine Island arc-related hydrothermal Vents, Calypso Vents, New Zealand, and Paleochori Bay, Greece / M. Nestmeyer, M. Keith, K.M. Haase, R. Klemm, P. Voudouris, U. Schwarz-

- Schampera, H. Strauss, M. Kati, A. Magganis // *Front. Earth Sci.* – 2021. – Vol. 9. – 18 p. DOI: 10.3389/feart.2021.641654. URL: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/feart.2021.641654/full> (дата обращения: 27.02.2024).
20. Tamanyu S., Wood C.P. Characterization of geothermal systems in volcano-tectonic depressions: Japan and New Zealand // *Bulletin of the Geological Survey of Japan.* – 2003. – Vol. 54. – № 3/4. – P. 117–129. DOI: 10.9795/bullgsj.54.117.
21. Inside the volcano: three-dimensional magmatic architecture of a buried shield volcano / F. Walker, N. Schofield, J. Millett, D. Jolley, S. Holford, S. Planke, D.A. Jerram, R. Myklebust // *Geology.* – 2020. – Vol. 49. – P. 243–247. DOI: 10.1130/G47941.1.
22. Алексеев В.И., Марин Ю.Б. Турмалин как индикатор оловородных проявлений касситерит-кварцевой и касситерит-силикатной формаций (на примере Верхнеурмийского рудного узла, Дальний Восток) // *Записки Горного института.* – 2019. – Т. 235. – С. 3–9. DOI: 10.31897/PMI.2019.1.3.
23. Гореликова Н.В., Таскаев В.И., Рассулов В.А. Структурно-химическая неоднородность колломорфного касситерита и минералы In, Pb, As в оловянных рудах месторождения Верхнее (Приморье, Россия) // *Известия высших учебных заведений. Геология и разведка.* – 2019. – № 4. – С. 11–18. DOI: 10.32454/0016-7762-2019-4-18-25.
24. Орехов А.А., Гоневчук В.Г., Семеняк Б.И. Олово Приморья. Кавалеровский рудный район // *Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле.* – 2019. – № 4. – Вып. 44. – С. 5–18. DOI: 10.31431/1816-5524-2019-3-43-5-18.
25. Ивашов П.В. Химическое выветривание касситерита как основа формирования биогеохимических ореолов рассеяния олова в растениях // *Региональные проблемы.* – 2019. – № 1. – С. 26–30. DOI: 10.31433/2618-9593-2019-22-1-26-30.
26. Петроченков Д.А. Коллекционные и ювелирные касситериты; перспективы добычи // *Отечественная геология.* – 2018. – № 3. – С. 68–77.
27. Гоневчук В.Г., Семеняк Б.И., Коростелев П.Г. Хингано-Охотский металлогенический пояс в концепции террейнов // *Рудные месторождения континентальных окраин.* – 2000. – № 1. – С. 35–54.
28. Ханчук А.И. Палеогеодинамический анализ формирования рудных месторождений Дальнего Востока России // *Рудные месторождения континентальных окраин.* – 2000. – № 1. – С. 5–34.
29. Составы расплавов и флюидный режим кристаллизации редкометалльных гранитов и пегматитов Тигриного Sn–W месторождения (Приморье) / С.З. Смирнов, Н.С. Бортников, В.Г. Гоневчук, Н.В. Гореликова // *Доклады Академии наук.* – 2014. – Т. 456. – № 1. – С. 95–100. DOI: 10.7868/S0869565214130246.
30. Indium in polymetallic mineralisation at the Gierczyn mine, Karkonosze-Izera Massif, Poland: results of EPMA and LA-ICP-MS investigations / K. Foltyn, V. Bertrandsson Erlandsson, G.A. Kozub-Budzyń, F. Melcher, A. Piastrzyński // *Geological Quarterly.* – 2020. – V. 64. – № 1. – P. 74–85. DOI: 10.7306/gq.1516.
31. Origin of the Jurassic-Cretaceous intraplate granitoids in Eastern China as a consequence of paleo-Pacific plate subduction / D. Hong, Y. Niu, Y. Xiao, P. Sun, J. Kong, P. Guo, F. Shao, X. Wang, M. Duan, Q. Xue, H. Gong, S. Chen // *Lithos.* – 2018. – Vol. 322. – P. 405–419. DOI: 10.1016/j.lithos.2018.10.027.
32. Jambor J.L., Owens d'Alton R. Vincennite in the Maggie porphyry copper deposit, British Columbia // *Canadian Mineralogist.* – 1987. – Vol. 25. – P. 227–228.
33. Hedenquist J.W., Richards J. The influence of geochemical techniques on the development of genetic models for porphyry copper deposits // *Reviews in Economic Geology.* – 1998. – Vol. 10. – P. 235–256. DOI: 10.5382/Rev.10.10.
34. Preliminary model of porphyry copper deposits: U.S. Geological Survey Open-File Report 2008–1321 / B.R. Berger, R.A. Ayuso, J.C. Wynn, R.R. Seal // *USGS.* – 2008. – 55 p.
35. Imai A. Mineral paragenesis, fluid inclusions and sulfur isotope systematics of the Lepanto Far Southeast porphyry Cu–Au deposit, Mankayan, Philippines // *Resource geology.* – 2000. – Vol. 50. – № 3. – P. 151–168. DOI: 10.1111/j.1751-3928.2000.tb00065.x.
36. Mechanisms for Pd–Au enrichment in porphyry-epithermal ores of the Elatsite deposit, Bulgaria / J. M. González-Jiménez, R. Piña, T. N. Kerestedjian, F. Gervilla, I. Borrajo, J. Farré-de Pablo, J. A. Proenza, F. Tornos, J. Roqué, F. Nieto // *Journal of Geochemical Exploration.* – 2021. – Vol. 220. – Iss. 106664. – 20 p. DOI: 10.1016/j.gexplo.2020.106664.
37. Orlandea E., Șerban-Nicolae V. A novel conceptual model of intrusion related gold bearing systems and exploration tools // *Studia UBB Geologia.* – 2020. – Vol. 63. – № 1. – P. 1–12. DOI: 10.5038/19-8602.63.1.1304.
38. Zhou L., Fan H., Ulrich T. Editorial for special issue “Critical metals in hydrothermal ores: resources, recovery, and challenges” // *Minerals.* – 2021. – Vol. 11. – 5 p. DOI: 10.3390/min11030299.
39. Distribution of indium, germanium, gallium and other minor and trace elements in polymetallic ores from a porphyry system: the Morococha district, Peru / D. Benites, L. Torró, J. Vallance, O. Laurent, P.E. Valverde, K. Kouzmanov, C. Chelle-Michou, L. Fontboté // *Ore Geology Reviews.* – 2021. – Vol. 136. – Iss. 104236. – 31 p. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2021.104236.
40. Rare and critical metals in pyrite, chalcopyrite, magnetite, and titanite from the Vathi porphyry Cu–Au±Mo deposit, Northern Greece / C.L. Stergiou, V. Melfos, P. Voudouris, L. Papadopoulou, P.G. Spry, I. Peytcheva, D. Dimitrova, E. Stefanova, K. Giouri // *Minerals.* – 2021. – Vol. 11. – № 6. – Iss. 630. – 28 p. DOI: 10.3390/min11060630.
41. Буханова Д.С., Чубаров В.М. Редкоземельные минералы в рудах Малмыжского золото-меднопорфирового месторождения (Хабаровский край) // *Записки РМО.* – 2019. – № 1. – С. 54–64. DOI: 10.30695/zrmo/2019.1481.05.
42. Fractionation of rare earth elements in greisen and hydrothermal veins related to A-type magmatism / M. Tillberg, O.M. Maskenskaya, H. Drake, J.K. Hogmalm, C. Broman, A.E. Fallick, M.E. Åström // *Geofluids.* – 2019. – P. 1–20. DOI: 10.1155/2019/4523214.
43. Rare earth element-bearing fluorite deposits of Turkey: an overview / H.S. Öztürk, S. Altuncu, N. Hanilçi, C. Kasapçı, K.M. Goodenough // *Ore Geology Reviews.* – 2019. – Vol. 105. – P. 423–444. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2018.12.021>
44. Alkaline-type epithermal gold deposit model: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2010–5070–R / K.D. Kelley, P.G. Spry, V.T. McLemore, D.L. Fey, E.D. Anderson // *USGS.* – 2020. – 74 p. DOI: 10.3133/sir20105070R.

45. Azizi M.R., Abedini A., Alipour S. Application of lanthanides tetrad effect as a geochemical indicator to identify fluorite generations: A case study from the Laal-Kan fluorite deposit, NW Iran. *Comptes Rendus // Géoscience – Sciences de la Planète*. – 2020. – Vol. 352. – Iss. 1. – P. 43–58. DOI: 10.5802/crgeos.2.
46. Krupičkaite, Cu₆[AsO₃(OH)]₆·8H₂O, a new copper arsenate mineral from Jáchymov (Czech Republic) / G. Steciuk, J. Sejkora, J. Čejka, J. Plášil, J. Hloušek // *Journal of Geosciences*. – 2021. – P. 37–50. DOI: 10.3190/jgeosci.318.
47. The role of continental crust in the formation of uraninite-based ore deposits / S.R. Lewis, A. Simonetti, L. Corcoran, S.S. Simonetti, C. Dorais, P.C. Burns // *Minerals*. – 2020. – Vol. 10. – Iss. 136. – 27p. DOI: 10.3390/min10020136.
48. Origin and evolution of magmas in the porphyry Au-mineralized Javorie Volcano (Central Slovakia): evidence from thermobarometry, melt inclusions and sulfide inclusions / B. Rottier, A. Audétat, P. Koděra, J. Lexa // *Journal of Petrology*. – 2019. – Vol. 60. – Iss. 12. – P. 2449–2482. DOI: 10.1093/petrology/egaa014.

Информация об авторе

Виктор Валентинович Сластников, старший геолог, ООО «Теллур С-В», Россия, 190068, г. Санкт-Петербург, ул. Союза Печатников, 8А; v_slastnikov@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8357-7387>

Поступила в редакцию: 20.03.2024

Поступила после рецензирования: 04.06.2024

Принята к публикации: 28.11.2024

REFERENCES

1. Arkhipov G.N. Economic importance of ore mineral resources in the Far Eastern region. *GIAB*, 2013, no. 1, pp. 270–276. (In Russ.) Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/ekonomicheskoe-znachenie-rudnyh-mineralnyh-resursov-v-dalnevostochnom-regione> (accessed 22 February 2024).
2. *Geodynamics, magmatism and metallogeny of the East of Russia*. Ed. by A.I. Khanchuk. Vladivostok, Dalnauka Publ., 2006. B. 1, 2. 981 p. (In Russ.)
3. Slastnikov V.V. Mineragenic type of ore occurrence Verkhnee-Zolotoe: results of petrographic research. *GIAB*, 2016, no. 10, pp. 283–303. (In Russ.)
4. Kemkin I.V. *Geodynamic evolution of Sikhote-Alin and the Japonomor region in the Mesozoic*. Moscow, Nauka Publ., 2006. 258 p. (In Russ.)
5. Davydova M.Yu., Martynov Yu.A., Perepelov A.B. Evolution of isotope-geochemical composition of rocks of the Uksichan volcano (Sredinny Ridge, Kamchatka) and its connection with the Neogene tectonic restructuring of Kamchatka. *Petrologiya*, 2019, vol. 27, no. 3, pp. 282–307. DOI: 10.31857/S0869-5903273282-307.
6. Segovia M.J., Diaz D., Slezak K., Zuniga F. Magnetotelluric study in the Los Lagos Region (Chile) to investigate volcano-tectonic processes in the Southern Andes. *Earth, Planets and Space*, 2021, vol. 73:5, 14 p. DOI: 10.1186/s40623-020-01332-w.
7. Hanchuk A.I., Ivanov V.V. Meso-Cenozoic geodynamic conditions and the gold mineralization of the Russian Far East. *Geology and geophysics*, 1999, vol. 40, no. 11, pp. 1635–1645. (In Russ.)
8. *State geological map of Russian Federation. Sheet L-53-XVII. Scale 1:200000. Geological map*. Ed. by A.V. Lyzganov. St Petersburg, VSEGEI Publ., 2019. 2 p. (In Russ.)
9. Sillitoe R.H. Porphyry copper systems. *Economic geology*, 2010, vol. 105, pp. 3–41. DOI: 10.2113/gsecongeo.105.1.3.
10. Lee C.-T.A., Tang M. How to make porphyry copper deposits. *Earth and Planetary Science Letters*, 2020, vol. 529, Iss. 115868, pp. 1–11. DOI: 10.1016/j.epsl.2019.115868.
11. Barber N.D., Edmonds M., Jenner F., Audétat A., Williams H. Amphibole control on copper systematics in arcs: Insights from the analysis of global datasets. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2021, vol. 307, pp. 192–211. DOI: 10.1016/j.gca.2021.05.034.
12. Zhao Y., Liu H., Qin K. Discussion on Au transportation mechanism in melt-magma-fluid in porphyry Cu deposit – a case study from Jinchang porphyry Au (Cu) deposit, Heilongjiang province, China. *Ore Geology Reviews*, 2019, vol. 111, Iss. 102968. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2019.102968. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0169136818305948?via%3Dihub> (accessed 27 February 2024).
13. Shatova N.V., Shatov V.V., Molchanov A.V., Petrov O.V., Terekhov A.V., Belova V.N., Leontev V.I. Geochemistry and petrography of hydrothermally altered rocks of the Ryabinovoe ore field (South Yakutia) as the basis for prediction of gold-copper-porphyry ore mineralization. *RgiM*, 2020, no. 84, pp. 71–96. (In Russ.)
14. Dvornik G.P. Types of metasomatic rocks: temperature conditions of formation, composition features, minerageny. *Proceedings of the Ural State Mining University*, 2020, Iss. 1 (57), pp. 63–72. (In Russ.) DOI: 10.21440/2307-2091-2020-1-63-72.
15. Trushin S.I., Kirillov V.E., Lapenko A.S. Noble metal ore formations in the activation zones in the eastern Yana-Kolyma Fold System (Magadan Region, Russia). *RgiM. Metallogeny*, 2021, no. 85, pp. 67–78. (In Russ.)
16. Ishikawa T. Some petrological considerations on the Miocene volcanic activities in green-tuff regions in Japan. *Journal of the Faculty of Science, Hokkaido University. Geology and mineralogy*, 1960, Ser. 4, vol. 10, no. 3, pp. 471–480.
17. Yilmaz T.I., Wadsworth F.B., Gilg H.A.I., Hess K.-U., Kendrick J.E., Wallace P.A., Lavallée Y., Utley J., Vasseur J., Nakada S., Dingwell D.B. Rapid alteration of fractured volcanic conduits beneath Mt Unzen. *Bulletin of Volcanology*, 2021, vol. 83, 14 p. DOI: 10.1007/s00445-021-01450-7.
18. Velásquez G., Carrizo D., Salvi S., Vela I., Pablo M., Pérez A. Tracking cobalt, REE and gold from a porphyry-type deposit by LA-ICP-MS: a geological approach towards metal-selective mining in tailings. *Minerals*, 2020, vol. 10, Iss. 109, 17 p. DOI: 10.3390/min10020109.
19. Nestmeyer M., Keith M., Haase K.M., Klemm R., Voudouris P., Schwarz-Schampera U., Strauss H., Kati M., Magganas A. Trace element signatures in pyrite and marcasite from Shallow Marine Island arc-related hydrothermal Vents, Calypso Vents, New

- Zealand, and Paleochori Bay, Greece. *Front. Earth Sci.*, 2021, vol. 9, 18 p. DOI: 10.3389/feart.2021.641654. Available at <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/feart.2021.641654/full> (accessed 27 February 2024).
20. Tamanyu S., Wood C. P. Characterization of geothermal systems in volcano-tectonic depressions: Japan and New Zealand. *Bulletin of the Geological Survey of Japan*, 2003, vol. 54, no. 3/4, pp. 117–129. DOI: 10.9795/bullgsj.54.117.
21. Walker F., Schofield N., Millett J., Jolley D., Holford S., Planke S., Jerram D.A., Myklebust R. Inside the volcano: three-dimensional magmatic architecture of a buried shield volcano. *Geology*, 2020, vol. 49, pp. 243–247. DOI: 10.1130/G47941.1.
22. Alekseev V.I., Marin Yu.B. Tourmaline as an indicator of tin occurrences of cassiterite-quartz and cassiterite-silicate formations (a case study of the Verkhneurmitsky ore cluster, Far East). *Journal of Mining institute*, 2019, vol. 235, pp. 3–9. (In Russ.) DOI: 10.31897/PMI.2019.1.3.
23. Gorelikova N.V., Taskaev V.I., Rassulov V.A. Structural and chemical heterogeneity of colloform cassiterite and In, Pb, As minerals at the tin ores for the Verkhnee deposit (Primorye, Russia). *Proceedings of Higher Educational Establishments. Geology And Exploration*, 2019, no. 4, pp. 11–18. (In Russ.) DOI: 10.32454/0016-7762-2019-4-18-25.
24. Orekhov A.A., Gonevchuk V.G., Semenyak B.I. Tin of Primorye. Kavalersky ore district. *Vestnik KRAUNC. Nauki o Zemle*, 2019, no. 4, Iss. 44, pp. 5–18. (In Russ.) DOI: 10.31431/1816-5524-2019-3-43-5-18.
25. Ivashov P.V. Chemical weathering of cassiterite as the basis for the formation of biogeochemical halos of tin scattering in plants. *Regionalnye problemy*, 2019, no. 1, pp. 26–30. (In Russ.) DOI: 10.31433/2618-9593-2019-22-1-26-30.
26. Petrochenkov D.A. Collection and Jewellery cassiterites; the perspectives of extraction. *Otechestvennaya geologiya*, 2018, no. 3, pp. 68–77. (In Russ.)
27. Gonevchuk V.G., Semenyak B.I., Korostelev P.G. The Khingan-Okhotsk metallogenic belt in the concept of terranes. *Rudnye mestorozhdeniya kontinentalnykh okrain*, 2000, no. 1, pp. 35–54. (In Russ.)
28. Hanchuk A.I. Paleogeodynamic analysis of the formation of ore deposits in the Russian Far East. *Rudnye mestorozhdeniya kontinentalnykh okrain*, 2000, no. 1, pp. 5–34. (In Russ.)
29. Smirnov S.Z., Bortnikov N.S., Gonevchuk V.G., Gorelikova N.V. Melt compositions and fluid crystallization regime of rare-metal granites and pegmatites of the Tigrinoye Sn-W deposit (Primorye). *Doklady Akademii nauk*, 2014, vol. 456, no. 1, pp. 95–100. (In Russ.) DOI: 10.7868/S0869565214130246.
30. Foltyn K., Bertrandsson Erlandsson V., Kozub-Budzyń G.A., Melcher F., Piestrzyński A. Indium in polymetallic mineralisation at the Gierczyn mine, Karkonosze-Izera Massif, Poland: results of EPMA and LA-ICP-MS investigations. *Geological Quarterly*, 2020, vol. 64, no. 1, pp. 74–85. DOI: 10.7306/gq.1516.
31. Hong D., Niu Y., Xiao Y., Sun P., Kong J., Guo P., Shao F., Wang X., Duan M., Xue Q., Gong H., Chen S. Origin of the Jurassic-Cretaceous intraplate granitoids in Eastern China as a consequence of paleo-Pacific plate subduction. *Lithos*, 2018, vol. 322, pp. 405–419. DOI: 10.1016/j.lithos.2018.10.027.
32. Jambor J.L., Owens d'Alton R. Vincennite in the Maggie porphyry copper deposit, British Columbia. *Canadian Mineralogist*, 1987, vol. 25, pp. 227–228.
33. Hedenquist J.W., Richards J. The influence of geochemical techniques on the development of genetic models for porphyry copper deposits. *Reviews in Economic Geology*, 1998, vol. 10, pp. 235–256. DOI: 10.5382/Rev.10.10.
34. Berger B.R., Ayuso R.A., Wynn J.C., Seal R.R. *Preliminary model of porphyry copper deposits: U.S.* Geological Survey Open-File Report 2008–1321. USGS, 2008, 55 p.
35. Imai A. Mineral paragenesis, fluid inclusions and sulfur isotope systematics of the Lepanto Far Southeast porphyry Cu-Au deposit, Mankayan, Philippines. *Resource geology*, 2000, vol. 50, Iss. 3, pp. 151–168. DOI: 10.1111/j.1751-3928.2000.tb00065.x.
36. González-Jiménez J.M., Piña R., Kerestedjian T.N., Gervilla F., Borrajo I., Farré-de Pablo J., Proenza J.A., Tornos F., Roqué J., Nieto F. Mechanisms for Pd-Au enrichment in porphyry-epithermal ores of the Elatsite deposit, Bulgaria. *Journal of Geochemical Exploration*, 2021, vol. 220, Iss. 106664, 20 p. DOI: 10.1016/j.gexplo.2020.106664.
37. Orlandea E., Șerban-Nicolae V. A novel conceptual model of intrusion related gold bearing systems and exploration tools. *Studia UBB Geologia*, 2020, vol. 63, no. 1, pp. 1–12. DOI: 10.5038/19-8602.63.1.1304.
38. Zhou L., Fan H., Ulrich T. Editorial for special issue “Critical metals in hydrothermal ores: resources, recovery, and challenges”. *Minerals*, 2021, vol. 11, 5 p. DOI: 10.3390/min11030299.
39. Benites D., Torró L., Vallance J., Laurent O., Valverde P.E., Kouzmanov K., Chelle-Michou C., Fontboté L. Distribution of indium, germanium, gallium and other minor and trace elements in polymetallic ores from a porphyry system: the Morococha district, Peru. *Ore Geology Reviews*, 2021, vol. 136, Iss. 104236, 31 p. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2021.104236.
40. Stergiou C.L., Melfos V., Voudouris P., Papadopoulou L., Spy P.G., Peytcheva I., Dimitrova D., Stefanova E., Giouri K. Rare and critical metals in pyrite, chalcopyrite, magnetite, and titanite from the Vathi Porphyry Cu-Au±Mo deposit, Northern Greece. *Minerals*, 2021, vol. 11, no. 6, Iss. 630, 28 p. DOI: 10.3390/min11060630.
41. Buhanova D.S., Chubarov V.M. Rare earth minerals in ores of the Malmyzhskoe gold-copper-porphyry deposit (Khabarovsk krai). *Zapiski RMO*, 2019, no. 1, pp. 54–64. (In Russ.) DOI: 10.30695/zrmo/2019.1481.05.
42. Tillberg M., Maskenskaya O.M., Drake H., Hogmalm J.K., Broman C., Fallick A.E., Åström M.E. *Fractionation of rare earth elements in greisen and hydrothermal veins related to A-type magmatism. Geofluids*, 2019, pp. 1–20. DOI: 10.1155/2019/4523214.
43. Öztürk H.S., Altuncu S., Haniçlı N., Kasapçı C., Goodenough K.M. Rare earth element-bearing fluorite deposits of Turkey: an overview. *Ore Geology Reviews*, 2019, vol. 105, pp. 423–444. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2018.12.021>
44. Kelley K.D., Spy P.G., McLemore V.T., Fey D.L., Anderson E.D. *Alkaline-type epithermal gold deposit model: U.S.* Geological Survey Scientific Investigations Report 2010–5070–R. USGS, 2020. 74 p. DOI: 10.3133/sir20105070R.
45. Azizi M.R., Abedini A., Alipour S. Application of lanthanides tetrad effect as a geochemical indicator to identify fluorite generations: a case study from the Laal-Kan fluorite deposit, NW Iran. *Comptes Rendus. Géoscience – Sciences de la Planète*, 2020, vol. 352, Iss. 1, pp. 43–58. DOI: 10.5802/crgeos.2.
46. Steciuk G., Sejkora J., Čejka J., Plášil J., Hloušek Krupičkaite J. Cu₆[AsO₃(OH)]₆·8H₂O, a new copper arsenate mineral from Jáchymov (Czech Republic). *Journal of Geosciences*, 2021, pp. 37–50. DOI: 10.3190/jgeosci.318.

47. Lewis S.R., Simonetti A., Corcoran L., Simonetti S.S., Dorais C., Burns P.C. The role of continental crust in the formation of uraninite-based ore deposits. *Minerals*, 2020, vol. 10, Iss. 136, 27 p. DOI:10.3390/min10020136.
48. Rottier B., Audétat A., Koděra P., Lexa J. Origin and evolution of magmas in the porphyry Au-mineralized Javorie Volcano (Central Slovakia): evidence from thermobarometry, melt inclusions and sulfide inclusions. *Journal of Petrology*, 2019, vol. 60, Iss. 12, pp. 2449–2482. DOI: 10.1093/petrology/egaa014.

Information about the author

Viktor V. Slastnikov, Leading Geologist, Tellur S-V LLC, 8, Soyuza Pechatnikov street, St. Petersburg, 190068, Russian Federation; v_slastnikov@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8357-7387>

Received: 20.03.2024

Revised: 04.06.2024

Accepted: 28.11.2024

УДК 621.3.035.221.72. 676.084.2
DOI: 10.18799/24131830/2025/2/4818
Шифр специальности ВАК: 2.6.6, 2.6.10

Лигносulfонатная система для ингибирования отложений солей кальция

Г.А. Тептерева^{1✉}, Л.З. Рольник¹, Р.Е. Агишев¹, Е.И. Гусарова², А.И. Нугаев³

¹ Уфимский государственный нефтяной технический университет, Россия, г. Уфа

² ООО «Уфимский научно-технический центр», Россия, г. Уфа

³ Экспериментальный завод «Нефтехим», Россия, г. Уфа

✉teptereva.tga@yandex.ru

Аннотация. Актуальность. Определяется необходимостью создания реагентных систем на основе сырьевых ресурсов отечественного происхождения. Особенностью разработанной ингибирующей системы является использование лигносульфоната как продукта «зеленой химии». Лигносulfонат является побочным продуктом химической переработки природного полимера – древесины. В зависимости от породы перерабатываемой древесины и способа ее делигнификации характеристики лигносульфонатов варьируются по показателю таннидности (дубящие свойства 12–36 %), по содержанию редуцирующих сахаров (3–16 %), по содержанию сухих веществ (46–52 %), по цветности концентрата и по ингибирующей способности в отношении солей кальция (от 45 до 60 %). **Цель.** Подбор модификатора матрицы лигносульфоната для получения ингибитора солеотложения с защитой более 90 %. **Методы.** Технология Turbiscan, основанная на многократном оптическом сканировании вials с образцами лигносульфонатной системы по высоте с регистрацией двух профилей: пропускания и обратного рассеивания лазерного излучения. **Результаты и выводы.** Проведена модификация матрицы лигносульфоната фосфоновыми функциональными группами оксиэтилидендифосфоновой кислоты (этидроновая кислота), способными создавать соединения с пропановой цепочкой мономерного звена лигносульфоната (фенилпропановая единица). Эффективность ингибирующей способности лигносульфонатной системы определяется расчетным путем по показателю TSI (Turbiscan Stability Index), характеризующему седиментационную стабильность испытуемых образцов. Стабильность образцов определяется профилями изменений сигналов по высоте образца и во времени испытания и используется для количественной интерпретации изменений, проходящих в исследуемом образце. Наилучшие результаты (92 %) получены на основе лигносульфоната нейтрально-сульфитного способа получения с высоким содержанием редуцирующих сахаров при содержании добавки ингибитора солеотложения не более 50 мг/л. Предположительно, полученные соединения квалифицируются как сложные эфиры спиртовых групп лигносульфоната и фосфоновых групп реагента-модификатора.

Ключевые слова: лигносульфонаты, ингибиторы солеотложений кальция, седиментационные исследования, редуцирующие сахара лигносульфонатов, ИК и СФ-спектры, фосфоновые функциональные группы

Для цитирования: Лигносulfонатная система для ингибирования отложений солей кальция / Г.А. Тептерева, Л.З. Рольник, Р.Е. Агишев, Е.И. Гусарова, А.И. Нугаев // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 2. – С. 42–51. DOI: 10.18799/24131830/2025/2/4818

UDC 621.3.035.221.72. 676.084.2
DOI: 10.18799/24131830/2025/2/4818

Lignosulfonate system for inhibition of calcium salt deposits

G.A. Teptereva^{1✉}, L.Z. Rolnik¹, R.E. Agishev¹, E.I. Gusarova², A.I. Nugaev³

¹ Ufa State Petroleum Technical University, Ufa, Russian Federation

² Ufa Scientific and Technical Center LLC, Ufa, Russian Federation

³ Neftechim Experimental Plant, Ufa, Russian Federation

✉teptereva.tga@yandex.ru

Abstract. Relevance. The need to create reagent systems based on raw materials of domestic origin. A feature of the developed inhibitory system is the use of lignosulfonate as a product of "green chemistry". Lignosulfonate is a byproduct of chemical processing of a natural polymer – wood. Depending on the type of processed wood and the method of its delignification, the characteristics of lignosulfonates vary in terms of tannidity (tanning properties 12–36%), in terms of reducing sugars (3–16%), in terms of solids (46–52%), in terms of concentrate color and inhibitory ability against calcium salts (from 45 to 60%). **Aim.** Selection of a lignosulfonate matrix modifier to produce a salt deposition inhibitor with protection of more than 90%. **Methods.** Turbiscan technology based on multiple optical scanning of vials with samples of the lignosulfonate system in height with registration of two profiles: transmission and backscattering of laser radiation. **Results and conclusions.** The lignosulfonate matrix was modified with phosphonic functional groups oxyethylidenediphosphonic acid (ethidronic acid) capable of creating compounds with the propane chain of the lignosulfonate monomer unit (phenylpropane unit). The effectiveness of the inhibitory ability of the lignosulfonate system is calculated by the value of the TSI (Turbiscan Stability Index), which characterizes the sedimentation stability of the tested samples. The stability of the samples is determined by the obtained profiles of changes in the signals received along the height of the sample and during the test and is used to quantify the changes taking place in the test sample. The best results (92%) were obtained on the basis of a lignosulfonate neutral-sulfite production method with a high content of reducing sugars, with a salt deposition inhibitor additive content of no more than 50 mg/l. Presumably, the obtained compounds are classified as esters of alcohol groups of lignosulfonate and phosphonic groups of the reagent modifier.

Keywords: lignosulfonates, calcite salt deposition inhibitors, sedimentation studies, lignosulfonate reducing sugars, IR and CF spectra, phosphonic functional groups

For citation: Tepтерева Г.А., Rolnik L.Z., Agishev R.E., Gusarova E.I., Nugaev A.I. Lignosulfonate system for inhibition of calcium salt deposits. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo assets Engineering, 2025, vol. 336, no. 2, pp. 42–51. DOI: 10.18799/24131830/2025/2/4818

Введение

Для множества технологических систем, особенно замкнутого типа, решение задач по снижению интенсивности солеотложений не теряет своей актуальности, несмотря на широкий спектр предлагаемых для этой цели товарных форм ингибирующих систем как веществ, способных подавлять или задерживать течение физико-химических процессов, возникающих за счет кристаллизации неорганических солей из пересыщенных растворов [1–3].

По механизму действия ингибиторы солеотложений условно классифицируют по трем направлениям: реагенты стехиометрического, сверхстехиометрического и субстехиометрического воздействия. Первые из перечисленных способны вступать в реакции комплексообразования с катионом малорастворимой соли в мольном соотношении 1:1 с образованием растворимого термодинамически устойчивого комплексного соединения, позволяющего получить полное подавление солеотложения. Это натриевая соль этилендиаминтетрауксусной кислоты (ЭДТА) и ряд других комплексонов [2–6]. Недостатком является применение комплексонов в больших количествах.

Замедление формирования отложений ингибиторами сверхстехиометрического действия основано на влиянии повышения ионной силы раствора на процесс кристаллизации малорастворимых солей путем введения реагентов. С ростом ионной силы раствора уменьшаются коэффициенты активности и увеличивается растворимость малорастворимой соли [3]. Например, известно, что хлорид натрия (NaCl) повышает растворимость кальцита и гипса в воде, замедляя процесс кристаллизации из-за уменьшения степе-

ни пересыщения: период индукции увеличивается в 3 раза, реагент (NaCl) при этом не расходуется и остается в системе в химически неизменном состоянии.

На современном этапе для борьбы с солеотложением применяются реагенты субстехиометрического воздействия. Непосредственного влияния на комплексообразование эти системы не оказывают, но способны эффективно смещать процесс образования осадка на более позднее время [4–7]. К реагентам субстехиометрического воздействия относятся: полифосфаты, фосфонаты и поликарбоксилаты [5, 6, 8–10].

Требования к составам и рецептурам товарных продуктов на современном этапе повышаются в сторону увеличения доли компонентов природного происхождения. Одним из перспективных направлений при создании современных отечественных систем, способных ингибировать отложения солей кальция, может быть применение побочного продукта химической переработки древесины – лигносульфоната в качестве сырьевой основы.

Объекты и методика исследования

Общее направление работы заключается в получении эффективного ингибитора солеотложения кальцита путем модификации матрицы лигносульфоната фосфоновыми функциональными группами (фосфорилирующий агент).

Объектами модификации являются лигносульфонаты:

- 1) сульфитного способа получения (pH 4–5) (ЛСТ);
- 2) нейтрально-сульфитного способа получения (pH 6–7) (НЛСТ).

Ароматическая часть древесины представлена лигнином. В природе лигнин встречается исключительно совместно с целлюлозой, которая составляет в древесине углеводную часть. Ароматическая и углеводная части соединены эфирной связью [11–16].

Однако существующие схемы строения лигнина и способ его соединения с углеводами в составе древесины являются только гипотетическим (рис. 1).

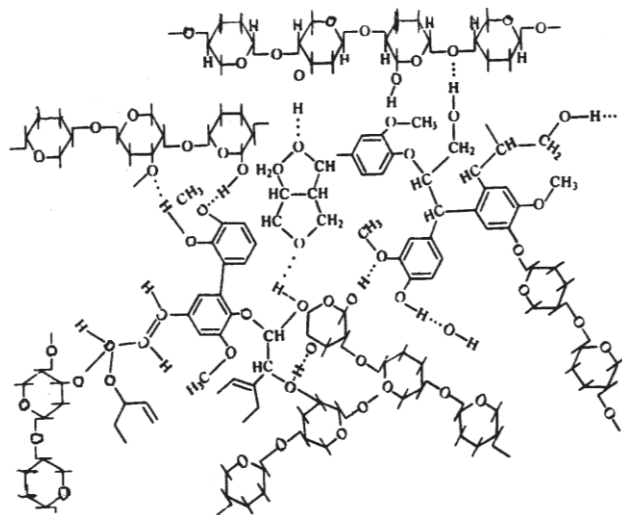


Рис. 1. Структура лигноуглеводной матрицы
Fig. 1. Structure of the lignocarbon matrices

Особенностью и причиной использования лигносульфонатов в целом спектре отраслей промышленности являются их дубящие (ингибирующие) свойства, обусловленные наличием в составе ароматической части коричневых спиртов: кониферилового (I), синапового (II), кумарового (III).

За мономерную единицу полимера (древесины) принята фенилпропановая единица (ФПЕ), принадлежащая конифериловому спирту. Фрагментарно ароматическая часть лигнина может иметь вид (рис. 2).

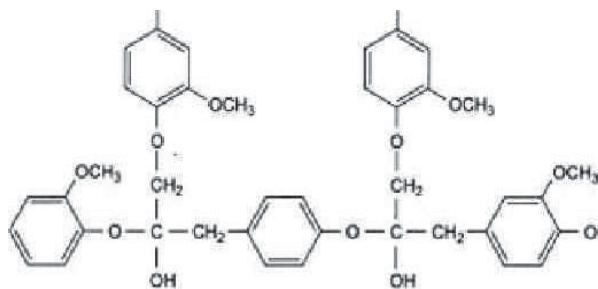


Рис. 2. Условная схема фрагмента макромолекулы лигнина
Fig. 2. Conditional diagram of a lignin macromolecule fragment

Известны три основные реакции, одновременно происходящие с лигнином при делигнификации древесины при сульфитной варке:

- реакция сульфирования;
- реакция гидролитической деструкции;
- реакция конденсации.

Варки проходят в присутствии сульфлирующего агента, которым в основном является сернистая кислота H_2SO_3 .

Указанные выше типы реакций позиционируются как гетеролитические реакции, протекающие по механизму нуклеофильного замещения, при котором боковая цепь фенилпропанового звена подвергается атаке нуклеофильных агентов [11–16]. Реакции сульфирования и гидролитической деструкции способствуют растворению лигнина. Сульфированные формы лигнина называют лигносульфонатами, и они являются побочными продуктами процесса получения целлюлозы (основного продукта целлюлозно-бумажных предприятий). Однако в сильноокислой среде варочных растворов растворение лигнина замедляется за счет реакции конденсации, которая активируется с ростом температуры и снижением pH среды, препятствуя этим его растворению и способности к сульфированию. Кроме того, в кислой среде идут коллоидно-химические изменения, снижающие реакционную способность лигнина и ведущие к его инактивации. В щелочной среде варочного раствора проходит реакция деметилирования, способствующая образованию пирокатехинов, что весьма благоприятно для повышения дубящих свойств лигносульфонатов.

В целом деструкция способствует, а конкурирующая с ней реакция конденсации препятствует делигнификации древесины. Защитой лигнина от конденсации является сульфирование, и наоборот, реакция конденсации препятствует реакции сульфирования. Причем долгое время обсуждаемый вопрос: в каком именно положении: α , β или γ , находится в ФПЕ сульфогруппа, получил свое окончательное решение как непринципиальный [13, 14].

Разрушение сетчатой структуры лигнина протекает по механизму сольволитической деструкции, что при кислой сульфитной варке обеспечивает достаточную степень делигнификации древесины.

Однако в нейтральной и щелочной средах разрушения сетчатой структуры лигнина практически не происходит, поскольку сольволитическая деструкция идет только в фенольных структурах через образование промежуточного хинонметида. Именно это обстоятельство является выраженной особенностью физико-химических свойств нейтральных лигносульфонатов [11–14]. Происходят коллоидно-химические изменения, ведущие к снижению и реакционной способности, и раство-

римости лигнина и его сульфопроизводного – лигносульфоната [14–16].

Состав и количественное содержание функциональных групп (метоксильных, фенольных гидроксильных, спиртовых) варьируется по способам варки и породам перерабатываемого сырья, обеспечивают возможность модифицирования матрицы лигносульфоната [14–16].

Ингибирующую способность жидкого образца лигносульфонатного ингибитора солеотложения по отношению к кальциту определяли по показателю седиментационной устойчивости с помощью технологии Turbiscan.

Технология Turbiscan основана на многократном оптическом сканировании по высоте виалы с образцом (рис. 1) с регистрацией двух профилей: пропускания и обратного рассеивания лазерного излучения. Прибор Turbiscan Tower позволяет анализировать стабильность дисперсных систем сразу в шести образцах. Величиной, характеризующей седиментационную стабильность образца, является показатель TSI (Turbiscan Stability Index). Полученные профили изменения сигналов исследуемых образцов варьируются по высоте и времени, далее суммируются и используются для количественной оценки свойств образца. Получаемый в результате оценки числовой параметр, характеризует скорость всех процессов дестабилизации. Чем больше это число, тем менее устойчивым является образец.

Для расчета кривых TSI используется приведенная ниже формула, основанная на вычислении накопительной суммы отклонений каждого следующего скана от предыдущего. Для каждого образца в виале сумма изменений нормируется на высоту образца H:

$$TSI = \sum_i \frac{\sum_h |scan_i(h) - scan_{i-1}(h)|}{H}.$$

Эффективность ингибирования образования солей определяли по уравнению:

$$\Xi = \frac{TSI_0 - TSI_{ing}}{TSI_0},$$

где TSI_0 – индекс стабильности, получаемый без применения ингибитора солеотложения (ИСО); TSI_{ing} – индекс стабильности с применением ИСО.

Условия эксперимента:

состав модели воды, мг/л: Ca^{2+} – 270; Mg^{2+} – 30,4; Na^+ – 3178,6; Cl^- – 4550; HCO_3^- – 1525,3; температура 48 °C (нагревание способствует активному выпадению кальцита и обеспечивает визуальную фиксацию фона и ингибитора). В качестве агента сравнения использовали водный раствор оксиэтилендифосфоновой кислоты (ОЭДФК) с концентрацией 20 мг/л.

Результаты исследования и их обсуждение

1. ИСО на основе нейтрально-сульфитного лигносульфоната

Концентрация ИСО на основе нейтрально-сульфитного лигносульфоната составляла 20, 50, 100, 150 мг/л.

Внешний вид виал через 4 часа 10 мин после начала сканирования (рис. 3).

Визуально при данных концентрациях раствор также оставался прозрачным, образование осадка не обнаруживалось, в отличие от фонового раствора и раствора с ОЭДФК в концентрации 20 мг/л.

2. ИСО на основе сульфитного лигносульфоната

Концентрации ИСО на основе ЛСТ – 20, 50, 100, 150 мг/л.

Внешний вид виал через 4 часа 10 мин после начала сканирования (рис. 4).

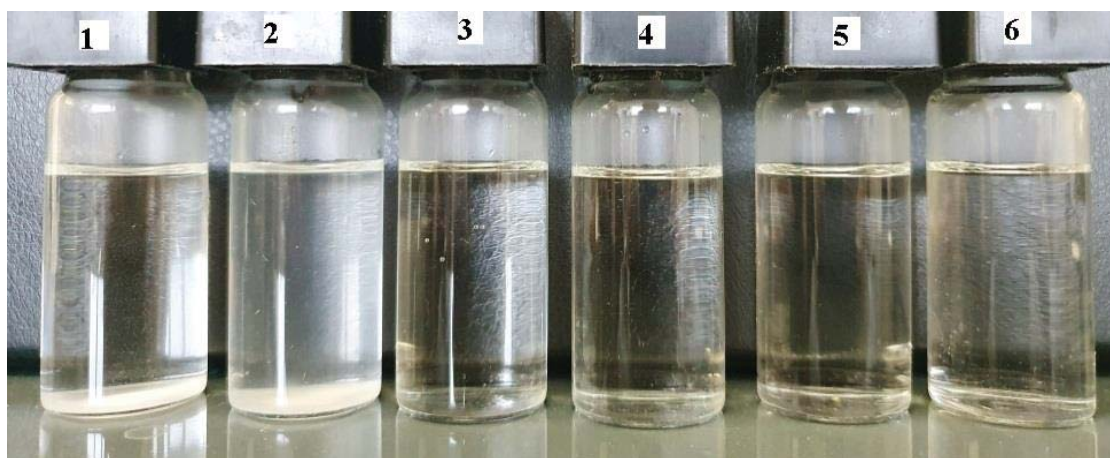


Рис. 3. Внешний вид виал через 4 часа 10 мин после начала опыта, слева направо: 1 – фон, 2 – ОЭДФК 20 мг/л, 3 – ИСО на основе НЛСТ 20 мг/л, 4 – ИСО НЛСТ 50 мг/л, 5 – ИСО НЛСТ 100 мг/л, 6 – ИСО НЛСТ 150 мг/л

Fig. 3. Appearance of the vial in 4 hours 10 min after the start of the experiment, from left to right: 1 – background, 2 – OEDFC 20 mg/L, 3 – ISO based on NLST 20 mg/L, 4 – ISO NLST 50 mg/L, 5 – ISO NLST 100 mg/L, 6 – ISO NLST 150 mg/L

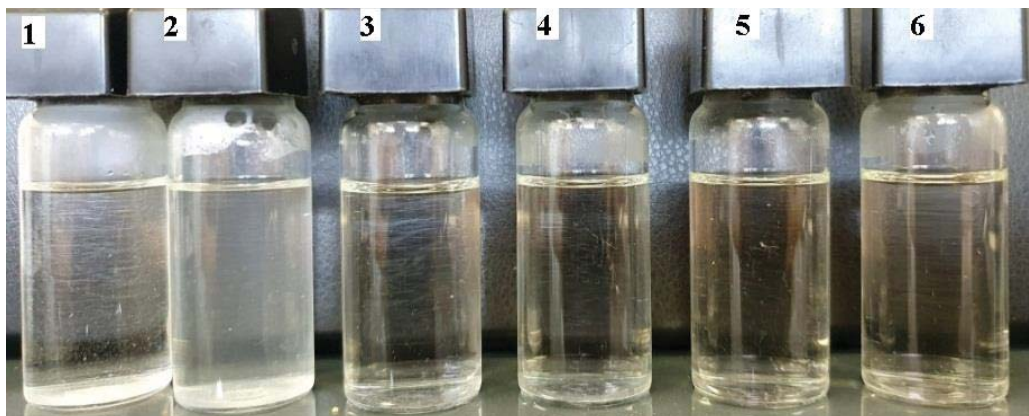


Рис. 4. Внешний вид виал через 4 часа 10 мин после начала опыта, слева направо: 1 – фон, 2 – ОЭДФК 20 мг/л, 3 – ИСО ЛСТ 20 мг/л, 4 – ИСО ЛСТ 50 мг/л, 5 – ИСО ЛСТ 100 мг/л, 6 – ИСО ЛСТ 150 мг/л

Fig. 4. Appearance of the vial in 4 hours 10 min after the start of the experiment, from left to right: 1 – background, 2 – OEDFC 20 mg/L, 3 – ISO LST 20 mg/L, 4 – ISO LST 50 mg/L, 5 – ISO LST 100 mg/L, 6 – ISO LST 150 mg/L

Визуально при данных концентрациях раствор оставался прозрачным, образование осадка не обнаруживалось, в отличие от фонового раствора и раствора ОЭДФК в концентрации 20 мг/л.

При этом необходимо отметить, что ОЭДФК показал низкую эффективность и значение TSI, близкое к фоновому. В образце с ОЭДФК образовывалась мелкодисперсная взвесь, часть которой оставалась во взвешенном состоянии по всему объему раствора, в то время как в фоновом образце кристаллы более крупные и оседали на дне и стенках виалы. Однако на начальном этапе кристаллообразования, в пределах 20–30 минут, ОЭДФК имеет высокую эффективность (рис. 4, 5).

3. ИК-спектр образца ИСО на основе НЛСТ получен на приборе ИК-Фурье-спектрометр в диапазоне частот 400–4000 cm^{-1} (рис. 5)

Данные ИК-спектра полученной лигносульфонатной системы для ингибирования солеотложений кальцита показывают наличие выраженного пика при значении волнового числа 3357,70 cm^{-1} , характерного для валентных колебаний внутри- и межмолекулярных водородных связей групп О-Н для

полимеров, которыми являются и лигносульфонаты. Волновые числа (1004,13 cm^{-1}) характерны для свободных спиртовых ОН-групп пропановой цепочки, а также для циклических структур (1154,50 cm^{-1}) со связью С-О. Наличие связи С=С подтверждается волновыми числами 1636,76, 1508,06 и 1458,49 cm^{-1} [17, 18, 19–22].

По совокупности можно предполагать наличие соединений ряда фурфуrolа, фурана. Наличие пиков при волновых числах 2888,8 и 2897 cm^{-1} свидетельствует об альдегидных (карбонильных) группах, что характерно для нейтрально-сульфитных лигносульфонатов, являющихся выражено недоокисленными соединениями. Все вышеописанное в модифицированных формах при использовании фосфоновых групп дополняется наличием пиков 2435,00–2362,81 cm^{-1} . Связь Р=О 1350–1175 cm^{-1} (свободные молекулы) и связь Р=О 1250–1150 cm^{-1} (ассоциированные молекулы) в спектре ИСО не обнаруживаются, однако получение фосфитов (RO)₃P 855–875 cm^{-1} вполне возможно, поскольку присутствует пик с волновым числом 930 cm^{-1} .

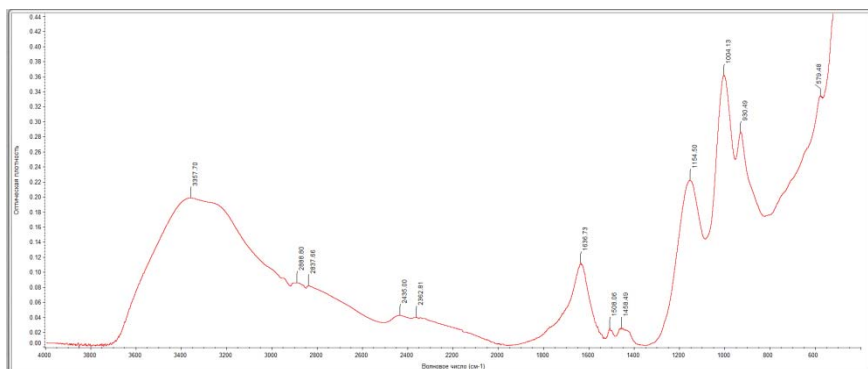


Рис. 5. ИК-спектр образца ИСО на основе нейтрально-сульфитного лигносульфоната

Fig. 5. IR spectrum of ISO sample based on neutral-sulfite lignosulfonate

4. УФ-спектры растворов лигносульфонатов до и после их модификации фосфоновыми группами ОЭДФК получены на спектрофотометре СПЕКСС -700 (рис. 6)

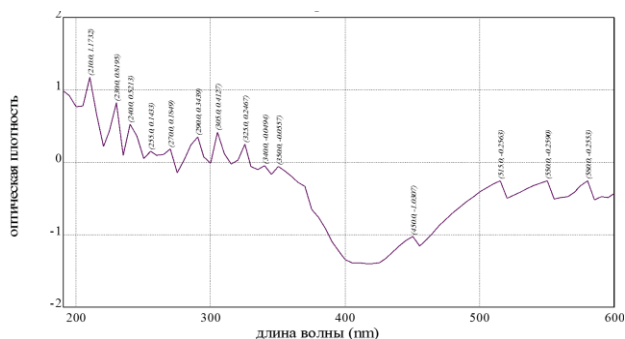


Рис. 6. Спектр НЛСТ без модификации фосфоновыми группами ОЭДФК

Fig. 6. NLST spectrum without phosphon group modification by EDPK

В диапазоне волн 190–350 нм отражается ароматическая составляющая лигносульфонатов (функциональные группы фенилпропанового звена лигнина). С 450 нм и далее в области длинноволнового излучения можно наблюдать углеводную часть спектра.

Спектр лигносульфоната, модифицированного фосфоновыми группами, имеет отличия от исходного спектра (рис. 7).

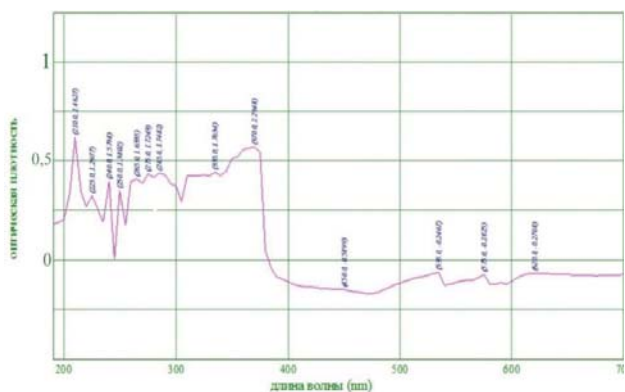


Рис. 7. Спектр НЛСТ с модификацией фосфоновыми группами ОЭДФК

Fig. 7. NLST spectrum modified with EDPK phosphon groups

Видно появление пиков при $\lambda=370$ нм, что является характеристикой образования новых соединений при взаимодействии НЛСТ с ОЭДФК.

Результаты расчета эффективности ингибирования образования кальцита в присутствии ОЭДФК и образца ИСО на основе НЛСТ показаны в табл. 1.

Таблица 1. Эффективность ингибирования образования кальцита ОЭДФК и ИСО на основе НЛСТ

Table 1. Potency of inhibition of calcite formation by EDPK and ISO based on NLST

Ингибитор и концентрация Inhibitor and concentration		TSI 4 часа TSI 4 hours	Эффективность Effectiveness, %
0		37,0	–
мг/л mg/l	ОЭДФК 20 OEDFC 20	13,8	62,7
	ИСО НЛСТ 20 ISO NLST 20	7,3	80,2
	ИСО НЛСТ 50 ISO NLST 50	2,8	92,4
	ИСО НЛСТ 100 ISO NLST 100	3,6	90,3
	ИСО НЛСТ 150 ISO NLST 150	8,4	77,3

Максимальная эффективность наблюдается при концентрации 50 мг/л и составляет 92,4 %.

Таким образом, ингибитор солеотложения на основе лигносульфоната нейтрально-сульфитного способа показал высокую эффективность ингибирования процесса отложения кальцита по результатам теста на седиментационную устойчивость.

Расчет эффективности ингибирования образования кальцита в присутствии ОЭДФК и ИСО на основе ЛСТ (табл. 2).

Таблица 2. Эффективность ингибирования кальцита ОЭДФК и ИСО на основе ЛСТ

Table 2. Effectiveness of calcite inhibition of EDPK and ISO based on LST

Ингибитор и концентрация Inhibitor and concentration		TSI 4 часа TSI 4 hours	Эффективность Effectiveness, %
0		10,1	–
мг/л mg/l	ОЭДФК 20 мг/л OEDFC 20 mg/L	13,8	62,7
	ИСО ЛСТ 20 мг/л ISO LST 20 mg/l	7,3	80,2
	ИСО ЛСТ 50 мг/л ISO LST 50 mg/l	2,8	92,4
	ИСО ЛСТ 100 мг/л ISO LST 100 mg/l	3,6	90,3
	ИСО ЛСТ 150 мг/л ISO LST 150 mg/l	8,4	77,3

На основании проведенных исследований можно обоснованно считать, что полученные на основе лигносульфонатов ИСО имеют высокую эффективность в отношении ингибирования отложения кальцита, что подтверждено тестами на седиментационную устойчивость в диапазоне концентраций 20–150 мг/л. Оптимальной можно считать концентрацию ИСО, равную 50 мг/л.

Для ИСО на основе НЛСТ эффективность выше на 15–18 % и составляет 92,4 % при концентрации 50 мг/л, что является характеристикой, соответствующей требованиям к системам ИСО, применяемым в нефтяной промышленности [18–21].

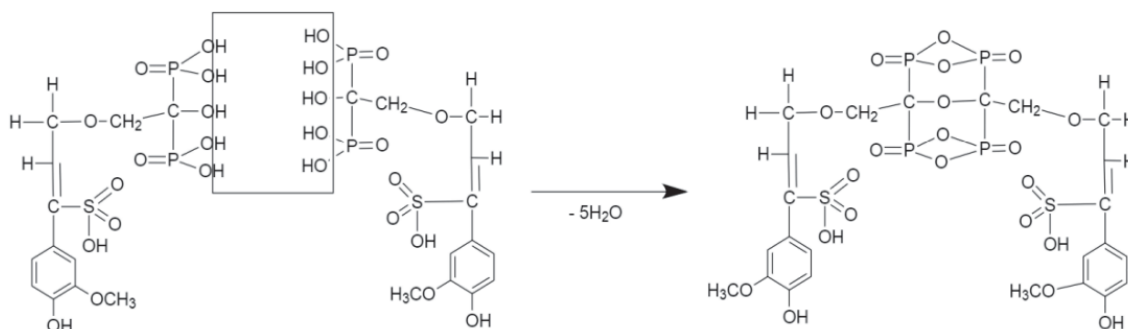


Рис. 8. Схема образования сложноэфирного соединения в результате реакции этерификации

Fig. 8. Scheme of an ester compound formation as a result of the esterification reaction

По рис. 7 видно, что для спектра НЛСТ без модификации фосфоноами характерна минимальная величина пиков при $\lambda=270\text{--}280$ нм (ОН-фенольные группы). В то время как модификация фосфоновыми группами ОЭДФК изменяет картину спектра лигносульфоната: появляется сдвиг оптической плотности, что отражается в наличии ранее отсутствующего пика при длине волны 370 нм и является свидетельством прохождения реакции взаимодействия.

Возможно образование соединения следующего строения по схеме (рис. 8).

Считаем, что модификация матрицы лигносульфоната возможна за счет встраивания фосфонового фрагмента в алифатическую пропановую цепочку мономерного звена лигносульфоната. Это согласуется с комплексообразующими свойствами фрагмента (HPO_3^{2-}). Фосфовые группы фосфорилирующего агента представлены рядом протонированных форм: PO_3^{2-} , PO_3H^- , PO_3H_2 . При этом PO_3^{2-} обладает значительно большей электроотрицательностью, чем группа COO^- , замена которой и осуществляется в процессе модификации. Подобная замена обоснована стереохимией фосфонат-иона, имеющего форму тетраэдра, в то время как для других функциональных групп фенилпропанового звена лигносульфоната характерна плоская конфигурация.

Все указанные комплексоны, содержащие фосфовые группы, объединяет отсутствие связанной воды в их составе. Для лигносульфоната протонирование алифатической цепочки ФПЕ способно привести к образованию крупных агломератов аниона лигносульфоновой кислоты вокруг катиона-комплексообразователя (кальция). Для фосфовых соединений характерна и большая дентантность, позволяющая объединить в комплексные структуры большее количество лигандов с образованием комплексонов ФПЕ лигносульфоната с катионами кальция [16–23].

Таким образом, появление нового соединения отражается УФ-спектром, который имеет выра-

женные отличия от УФ-спектра исходного НЛСТ. В коротковолновой области (200–400 нм) видно, что все пики пропорционально сместились в сторону повышения оптической плотности (D) (гипохромный эффект). При этом нечеткие пики трансформировались в более выраженные (265 и 285 нм), что характерно для этерифицированных фенольных фрагментов. В области более 400 нм, наоборот, спектр исходного ЛСТ претерпевает небольшой гиперхромный эффект, при котором пики 535 и 575 нм вырождаются и появляется выраженный пик на 405 нм, что свидетельствует о наличии гипсохромного сдвига и является признаком образования эфирных связей.

Кроме того, видно появление «плеча» в области 310–336 нм, что доказывает образование новых продуктов. Падение оптической плотности в области 390–410 нм объясняется аддитивной разницей поглощений ряда полученных изолированных хромоформных систем.

В целом приведенные УФ-спектры показывают, что реагентные системы на основе НЛСТ с модификацией фосфовыми группами способствуют образованию комплексонов и появлению эфирных групп, что коррелирует с результатами сканирования образцов ИСО по технологии Турбискан.

Выводы

1. Разработана новая лигносульфонатная система с защитным действием 92 %, предназначенная для защиты от отложений кальцита в технологических схемах различного назначения.
2. Получены спектральные характеристики разработанной лигносульфонатной системы, отражающие возможность встраивания фосфовых функциональных групп в матрицу лигносульфоната
3. Установлено, что наиболее эффективной основой для получения ингибитора солеотложений кальцита является лигносульфонат только нейтрально-сульфитного способа делигнификации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Стабилизация набухающих алюмосиликатных суспензий / К.А. Овчинников, Е.В. Подлеснова, Ф.Э. Сафаров, А.Т. Ахметов, А.В. Фахреева, Е.И. Гусарова, Н.А. Сергеева, А.Г. Телин // Коллоидный журнал. – 2023. – Т. 85. – № 6. – С. 795–805. DOI: 10.31857/S0023291223600773
2. Synthesis and properties of novel fluorescent-tagged polyacrylate-based scale inhibitors / K. Popov, M. Oshchepkov, S. Kamagurov, S. Tkachenko, Yu. Dikareva, G. Rudakova // Journal of applied polymer science – 2017. – Vol. 134. – Iss. 26. – P. 45017. DOI: 10.1002/app.45017
3. Barite crystallization in presence of novel fluorescent-tagged antiscalants / M. Oshchepkov, K. Popov, A. Ryabova, A. Redchuk, S. Tkachenko, J. Dikareva, E. Koltinova // International Journal of Corrosion and Scale Inhibition. – 2019. – Vol. 8. – № 4. – P. 998–1021. DOI: 10.17675/2305-6894-2019-8-4-12.
4. Углеводы – новый класс «зеленых» ингибиторов солеотложений / В.А. Докичев, Е.И. Коптяева, Ф.Г. Ишмуратов, А.Г. Телин, А.И. Волошин, С.Р. Алимбекова, С.Н. Греков, Ю.В. Томилов, Н.Э. Нифантьев // Нефтяное хозяйство. – 2016. – № 5. – С. 92–94.
5. Gypsum crystallization during reverse osmosis desalination of water with high sulfate content in presence of a novel fluorescent-tagged polyacrylate / M. Oshchepkov, V. Golovesov, A. Ryabova, A. Redchuk, S. Tkachenko, A. Pervov, K. Popov // Crystals. – 2020. – Vol. 10. – Iss. 4. – P. 309–335. DOI: 10.3390/cryst10040309.
6. DLS study of a phosphonate induced gypsum scale inhibition mechanism using indifferent nanodispersions as the standards of a light scattering intensity comparison / K.I. Popov, M.S. Oshchepkov, N.A. Shabanova, Yu.M. Dikareva, V.E. Larchenko, E.Ya. Koltinova // International Journal of Corrosion and Scale Inhibition. – 2018. – Vol. 7. – Iss. 1. – P. 9–24. DOI: 0.17675/2305-6894-2018-7-1-2.
7. Арабиногалактан – эффективный ингибитор солеотложения карбоната кальция / Ф.Г. Ишмуратов, Е.И. Коптяева, А.И. Волошин, А.Г. Телин, Ю.В. Томилов, Н.Э. Нифантьев, В.А. Докичев // Журнал прикладной химии. – 2015. – Т. 88. – № 12. – С. 1672–1675.
8. Visualization of a novel fluorescent-tagged bisphosphonate behavior during reverse osmosis desalination of water with high sulfate content / M. Oshchepkov, V. Golovesov, A. Ryabova, S. Tkachenko, A. Redchuk, H. Rönkkömäki, G. Rudakova, A. Pervov, K. Popov // Separation and Purification Technology. – 2021. – Vol. 255. – P. 117382. DOI: 0.1016/j.seppur.2020.117382.
9. Современное состояние разработок биоразлагаемых ингибиторов солеотложений для различных систем водопользования (обзор) / К.И. Попов, Н.Е. Ковалева, Г.Я. Рудакова, С.П. Комбарова, В.Е. Ларченко // Теплоэнергетика. – 2016. – № 2. – С. 46–58. DOI: 10.1134/S0040363616010094.
10. Crystal nucleation in liquids: open questions and future challenges in molecular dynamics simulations / G.C. Sosso, J. Chen, S.J. Cox, M. Fitzner, P. Pedevilla, A. Zen, A. Michaelides // Chemical Reviews. – 2016. – Vol. 116. – Iss. 12. – P. 7078–7116. DOI: 10.1021/acs.chemrev.5b00744.
11. Никитин В.М., Оболенская А.В., Щеголев В.П. Химия древесины и целлюлозы. – М.: Лесная промышленность, 1978. – 368 с.
12. Никитин В.М. Теоретические основы делигнификации. – М.: Лесная промышленность, 1981. – 296 с.
13. Тептерева Г.А. Становление и развитие производства и применения лигносульфонатов и их модифицированных производных. – Уфа: УНПЦ «Нефтегазовое дело», 2023. – 275 с.
14. Емельянова И.З. Химико-технический контроль гидролизного производства. – М.: Лесная промышленность, 1976. – 322 с.
15. Непенин Н.Н. Технология целлюлозы. Производство сульфитной целлюлозы. В 3-х т. изд. 2-е, перераб. / под ред. Ю.Н. Непенина. – М.: Лесная промышленность, 1976. – Т. 1. – 624 с.
16. Вешняков В.А., Хабаров Ю.Г., Камакина Н.Д. Сравнение методов определения редуцирующих веществ: метод Бертрана, эбулиостатический и фотометрический методы // Химия растительного сырья. – 2008. – № 4. – С. 47–50.
17. Phosphorus chemistry: from small molecules, to polymers, to pharmaceutical and industrial applications / K.E. Papathanasiou, M. Vassaki, A. Spinhaki, F.-E.G. Alatzoglou, E. Tripodanos, P. Turhanen, K.D. Demadis // Pure and Applied Chemistry. – 2019. – Vol. 91. – Iss. 3. – P. 421–441. DOI: 10.1515/pac-2018-1012.
18. Investigating the development and reproducibility of heterogeneous gypsum scaling on reverse osmosis membranes using real-time membrane surface imaging / J. Benecke, M. Haas, F. Baur, M. Ernst // Desalination. – 2018. – Vol. 428. – P. 161–171. DOI: 10.1016/j.desal.2017.11.025.
19. Громов С.Л. Осадкообразование в рулонных обратноосмотических и нанофильтрационных элементах и способы его предотвращения // Теплоэнергетика. – 2014. – № 6. – С. 49–58. DOI: 10.1134/S0040363614060034.
20. Кузькин С.Б., Бессер А.Д. К разработке новой концепции технологии переработки руд цветных металлов // Цветная металлургия. – 2000. – № 1. – С. 1–5.
21. Ларин А.Б., Карпычев Е.А. Вопросы и проблемы энерго- и ресурсосбережения на ТЭС // Энергосбережение и водоподготовка. – 2018. – № 1. – С. 3–11.
22. Бекназаров Э.М., Лутфуллаев С.Ш., Сайдалов Ф.М. Исследование ИК-спектры при переработке вторичных полимеров // Universum: технические науки: электрон. научн. журн. – 2021. – Т. 5 (86). DOI: 10.32743/UniTech.2021.86.5.11716. URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/11716> (дата обращения: 10.08.2024).
23. A dynamic scale location monitor method to predict oilfield blockage during water flooding / W. Kang, T. Wang, H. Zhang, X. Hou, X. Zhang, T. Zhu, C. Chen, H. Yang // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2020. – Vol. 191. – P. 107168. DOI: 10.1016/j.petrol.2020.107168

Информация об авторах

Галина Алексеевна Тептерева, доктор технических наук, профессор кафедры общей, аналитической и прикладной химии Уфимского государственного нефтяного технического университета, Россия, 450068, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1, teptereva.tga@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2328-6761>

Любовь Зелиховна Рольник, доктор химических наук, профессор кафедры общей, аналитической и прикладной химии Уфимского государственного нефтяного технического университета, Россия, 450068, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1, rolnikk@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8402-1516>

Роман Евгеньевич Агишев, аспирант кафедры общей, аналитической и прикладной химии Уфимского государственного нефтяного технического университета, Россия, 450068, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1, roman.agishev@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0006-5361-2774>

Екатерина Игоревна Гусарова, заведующая лабораторией ООО «Уфимский научно-технический центр» Россия, 450076, г. Уфа, ул. Аксакова, 59; gusarovaei@ufntc.ru; <https://orcid.org/0009-0006-9203-6175>

Андрей Ильгизович Нугаев, Заместитель заведующего лабораторией ООО «Экспериментальный завод "Нефтехим"», Россия, 450078, г. Уфа, ул. Зеленая Роща, 8; nugaevai@neftehim.su; <https://orcid.org/0009-0005-6991-3443>

Поступила в редакцию: 26.08.2024

Поступила после рецензирования: 07.10.2024

Принята к публикации: 24.12.2024

REFERENCES

1. Ovchinnikov K.A., Podlesnova E.V., Safarov F.E., Akhmetov A.T., Fakhreeva A.V., Gusarova E.I., Sergeeva N.A., Telin A.G. Stabilization of swelling aluminosilicate suspensions. *Colloidal journal*, 2023, vol. 85, no. 6, pp. 795–805. (In Russ.) DOI: 10.31857/S0023291223600773.
2. Popov K., Oshchepkov M., Kamagurov S., Tkachenko S., Dikareva Yu., Rudakova G. Synthesis and properties of novel fluorescent-tagged polyacrylate-based scale inhibitors *Journal of applied polymer science*, 2017, vol. 134, Iss. 26, pp. 45017. DOI: 10.1002/app.45017
3. Popov K., Ryabova A., Redchuk A., Tkachenko S., Dikareva J., Koltinova E., Oshchepkov M. Barite crystallization in presence of novel fluorescent-tagged antiscalants. *International Journal of Corrosion and Scale Inhibition*, 2019, vol. 8, no. 4, pp. 998–1021. DOI: 10.17675/2305-6894-2019-8-4-12.
4. Dokichev V.A., Koptyaeva E.I., Ishmuratov F.G., Telin A.G., Voloshin A.I., Alimbekova S.R., Grekov S.N., Tomilov Yu.V., Nifantiev N.E. Carbohydrates – a new class of "green" salt deposition inhibitors. *Oil industry*, 2016, no. 5, pp. 92–94.
5. Oshchepkov M., Golovesov V., Ryabova A., Redchuk A., Tkachenko S., Pervov A., Popov K. Gypsum crystallization during reverse osmosis desalination of water with high sulfate content in presence of a novel fluorescent-tagged polyacrylate. *Crystals*, 2020, vol. 10, Iss. 4, pp. 309–335. DOI: 10.3390/cryst10040309.
6. Popov K.I., Oshchepkov M.S., Shabanova N.A., Dikareva Yu.M., Larchenko V.E., Koltinova E.Ya. DLS study of a phosphonate induced gypsum scale inhibition mechanism using indifferent nanodispersions as the standards of a light scattering intensity comparison *International Journal of Corrosion and Scale Inhibition*, 2018, vol. 7, Iss. 1, pp. 9–24. DOI: 0.17675/2305-6894-2018-7-1-2.
7. Ishmuratov F.G., Koptyaeva E.I., Voloshin A.I., Telin A.G., Tomilov Yu.V., Nifantiev N.E., Dokichev V.A. Arabinogalactan is an effective inhibitor of calcium carbonate salt deposition. *Russian Journal of Applied Chemistry*, 2015, vol. 88, no. 12, pp. 1672–1675. (In Russ.)
8. Oshchepkov M., Golovesov V., Ryabova A., Tkachenko S., Redchuk A., Rönkkömäki H., Rudakova G., Pervov A., Popov K. Visualization of a novel fluorescent-tagged bisphosphonate behavior during reverse osmosis desalination of water with high sulfate conten. *Separation and Purification Technology*, 2021, vol. 255, pp.117382. DOI: 0.1016/j.seppur.2020.117382.
9. Popov K.I., Kovaleva N.E., Rudakova G.Ya., Kombarova S.P., Larchenko V.E. The current state of development of biodegradable salt deposition inhibitors for various water use systems (review). *Teploenergetika*, 2016, no. 2, pp. 46–58. (In Russ.) DOI: 10.1134/S0040363616010094.
10. Soso G.C., Chen J., Cox S.J., Fitzner M., Pedevilla P., Zen A, Michaelides A. Crystal nucleation in liquids: open questions and future challenges in molecular dynamics simulations. *Chemical Reviews*, 2016, vol. 116, Iss. 12, pp. 7078–7116. DOI: 10.1021/acs.chemrev.5b00744.
11. Nikitin V.M., Obolenskaya A.V., Shchegolev V.P. *Chemistry of wood and cellulose*. Moscow, Lesnaya promyshlennost Publ., 1978. 368 p. (In Russ.)
12. Nikitin V.M. *Theoretical foundations of delignification*. Moscow, Lesnaya promyshlennost Publ., 1981. 296 p. (In Russ.)
13. Teptereva G.A. *Formation and development of production and application of lignosulfonates and their modified derivatives*. Ufa, Ufa Scientific and Publication Center Oil and Gas business, 2023. 275 p. (In Russ.)
14. Yemelyanova I.Z. *Chemical and technical control of hydrolysis production*. Moscow, Lesnaya promyshlennost Publ., 1976. 322 p. (In Russ.)
15. Nepenin N.N. *Pulp technology. Production of sulfite cellulose*. 2nd ed., reprint. Ed. by Yu.N. Nepenin. Moscow, Lesnaya promyshlennost Publ., 1976. Vol. 1, 624 p.
16. Veshnyakov V.A., Khabarov Yu.G., Kamakina N.D. Comparison of methods for determining reducing substances: Bertrand's method, ebulliostatic and photometric methods. *Chemistry of vegetable raw materials*, 2008, no. 4, pp. 47–50. (In Russ.)

17. Papathanasiou K.E., Vassaki M., Spinthaki A., Alatzoglou F.-E.G., Tripodianos E., Turhanen P., Demadis K.D. Phosphorus chemistry: from small molecules, to polymers, to pharmaceutical and industrial applications. *Pure and Applied Chemistry*, 2019, vol. 91, Iss. 3, pp. 421–441. DOI: 10.1515/pac-2018-1012.
18. Benecke J., Haas M., Baur F., Ernst M. Investigating the development and reproducibility of heterogeneous gypsum scaling on reverse osmosis membranes using real-time membrane surface imaging. *Desalination*, 2018, vol. 428, pp. 161–171. DOI: 10.1016/j.desal.2017.11.025.
19. Gromov S.L. Sedimentation in rolled reverse osmotic and nanofiltration elements and ways to prevent it. *Thermal power engineering*, 2014, no. 6, pp. 49–58. (In Russ.) DOI: 10.1134/S0040363614060034.
20. Kuzkin S.B., Besser A.D. Towards the development of a new concept of technology for processing non-ferrous metal ores. *Non-ferrous metallurgy*, 2000, no. 1, pp. 1–5.
21. Larin A.B., Karpychev E.A. Issues and problems of energy and resource conservation at thermal power plants. *Energy saving and water treatment*, 2018, no. 1, pp. 3–11.
22. Beknazarov E.M., Lutfullaev S.Sh., Saidalov F.M. Investigation of IR spectra in the processing of secondary polymers. *Universum: technical sciences: electron. scientific journal*, 2021, vol. 5 (86). DOI: 10.32743/UniTech.2021.86.5.11716. Available at: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/11716> (accessed 10 August 2024).
23. Kang W., Wang T., Zhang H., Hou X., Zhang X., Zhu T., Chen C., Yang H. A dynamic scale location monitor method to predict oilfield blockage during water flooding. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2020, vol. 191, pp. 107168. DOI: 10.1016/j.petrol.2020.107168

Information about the authors

Galina A. Teptereva, Dr. Sc., Professor, Ufa State Petroleum Technical University, 1, Kosmonavtov street, Ufa, 450068, Russian Federation, teptereva.tga@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2328-6761>

Lyubov Z. Rolnik, Dr. Sc., Professor, Ufa State Petroleum Technical University, 1, Kosmonavtov street, Ufa, 450068, Russian Federation, rolnikk@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8402-1516>

Roman E. Agishev, Postgraduate Student, Ufa State Petroleum Technical University, 1, Kosmonavtov street, Ufa, 450068, Russian Federation, roman.agishev@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0006-5361-2774>

Ekaterina I. Gusarova, Head of the Laboratory, Ufa Scientific and Technical Center LLC, 59, Aksakov street, Ufa, 450076, Russian Federation, gusarovaei@ufntc.ru; <https://orcid.org/0009-0006-9203-6175>

Andrey I. Nugaev, Deputy Head of the Laboratory, Experimental Plant "Neftekhim" 8, Zelenaya Roshcha street, Ufa, 450078, Russian Federation; nugaevai@neftehim.su, <https://orcid.org/0009-0005-6991-3443>

Received: 26.08.2024

Revised: 07.10.2024

Accepted: 24.12.2024

УДК 504.064
DOI: 10.18799/24131830/2025/2/4875
Шифр специальности ВАК: 25.00.36

Железомарганцевая геохимическая аномалия в питьевых водах: оценка рисков для здоровья населения

А.И. Беляновская^{1✉}, Е.А. Солдатова², Е.В. Крестьянникова¹

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

² Институт лесоведения РАН, Россия, с. Успенское

✉alexandra.belyanovskaya@outlook.com

Аннотация. *Цель:* оценка неканцерогенного риска для здоровья населения, связанного с повышенными концентрациями Fe и Mn. Для этого проводилось изучение химического состава воды из нецентрализованных источников водоснабжения (колодцы, скважины) на западе Тюменской области в районе города Тюмени, зафиксирована железомарганцевая биогеохимическая аномалия в питьевой воде. *Методы.* Пробы анализировались методами количественного химического анализа. Моделирование проводилось с использованием метода изучения случайных процессов – метод Монте-Карло. Это позволило учесть влияние природных факторов на растворимость металлов. Параметры модели включали концентрации Fe и Mn, а также биодоступность металлов в воде. *Результаты* исследования показали многократное превышение предельно допустимых концентраций (ПДК) для Fe (~10) и Mn (~2), однако уровень неканцерогенного риска для здоровья населения в большинстве случаев остался низким. В 5 % случаев индекс опасности приближается к пороговому значению, требуя повышенного внимания. Наиболее значимыми факторами оказались природные параметры, такие как pH воды и содержание органических веществ, влияющие на растворимость металлов (Fe, Mn). *Выводы.* Несмотря на низкий уровень неканцерогенного риска для здоровья населения, регулярный мониторинг и дополнительные меры по улучшению качества воды из нецентрализованных источников водоснабжения необходимы. Геохимические условия (pH, Eh) и сезонные изменения играют ключевую роль в рисках для здоровья, связанных с употреблением воды из источников данного типа.

Ключевые слова: питьевая вода, железо, марганец, биогеохимия, оценка риска

Благодарности. Анализ проб воды и статистическая обработка полученных результатов подготовлены в рамках реализации проекта Российского научного фонда № 23-77-01077. Анализ гидрогеологического строения и накопления растворенного органического вещества в болотных и поверхностных водах Тарманского болотного массива и прилегающих территорий проведен в рамках реализации проекта Российского научного фонда № 23-77-10012.

Для цитирования: Беляновская А.И., Солдатова Е.А., Крестьянникова Е.В. Железомарганцевая геохимическая аномалия в питьевых водах: оценка рисков для здоровья населения // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 2. – С. 52–65. DOI: 10.18799/24131830/2025/2/4875

UDC 504.064
DOI: 10.18799/24131830/2025/2/4875

Geochemical anomaly of iron and manganese in drinking water: health risk assessment

A.I. Belyanovskaya^{1✉}, E.A. Soldatova², E.V. Krestyannikova¹

¹ National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

² Institute of Forest Science Russian Academy of Sciences, Uspenskoe, Russian Federation

✉alexandra.belyanovskaya@outlook.com

Abstract. Aim. To assess the non-carcinogenic health risks associated with elevated concentrations of Fe and Mn in drinking water. Water samples were collected from decentralized sources (wells, boreholes) in the western Tyumen region, where an iron-manganese biogeochemical anomaly has been identified. **Methods.** Quantitative analysis and Monte Carlo simulations were applied to account for natural factors influencing metal solubility. The model parameters included Fe, Mn concentrations, and metal bioavailability in water. **Results.** Fe exceeded permissible limits by ~10 times and Mn by ~2 times. Despite these high concentrations, non-carcinogenic health risks remained low in most cases. However, in 5% of cases, the hazard quotient approached critical values, requiring increased attention. Significant factors influencing metal solubility were water pH and organic matter content. **Conclusions.** Although the overall risk is low, regular monitoring and additional water quality improvements are necessary. Geochemical conditions (pH, Eh) and seasonal variations are critical factors affecting health risks associated with consuming water from these sources.

Keywords: drinking water, iron, manganese, biogeochemistry, health risk assessment

Acknowledgements. Water sample analysis and statistical processing of the obtained results were conducted as part of the Russian Science Foundation project no. 23-77-01077. The analysis of hydrogeological structure and the accumulation of dissolved organic matter in the peat and surface waters of the Tarmanskoe Fen and surrounding areas were carried out within the framework of the Russian Science Foundation project no. 23-77-10012.

For citation: Belyanovskaya A.I., Soldatova E.A., Krestyannikova E.V. Geochemical anomaly of iron and manganese in drinking water: health risk assessment. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 2, pp. 52–65. DOI: 10.18799/24131830/2025/2/4875

Введение

Риски для здоровья населения, связанные с качеством питьевой воды, могут усугубляться под влиянием геохимических аномалий, которые влияют на состав природных вод [1, 2]. В статье рассматривается западная часть Тюменской области в районе г. Тюмени, на территории которой находится железо-марганцевая геохимическая аномалия [3, 4]. Повышенные концентрации Fe, Mn в воде из различных источников водоснабжения представляют потенциальную угрозу для здоровья населения и требуют проведения комплексной оценки риска [5–8].

Накопление Fe, Mn в водопроводной воде в концентрациях, превышающих ПДК, оказывает неблагоприятные эффекты для органов пищеварения, мочеполовой системы, кожных покровов и слизистых оболочек, эндокринной системы, являются потенциальными возбудителями заболеваний полости рта [9, 10]. При длительном воздействии эти элементы могут вызывать различные патологические состояния [10–12]. Fe, Mn в результате анализа данных Федерального информационного фонда данных социально-гигиенического мониторинга (ФИФ СГМ) были отнесены к приоритетным для мониторинга в Российской Федерации химическим веществам.

Известно, что Fe и Mn подвергаются сезонным превращениям между растворенной и твёрдой фазами под влиянием редокс процессов [13] и колебаний других параметров химического состава (pH, концентрация карбонат-иона и растворенного органического вещества (РОВ)) [14], что влияет на их концентрацию в природных водах и биодоступность, и, соответственно, на уровень воздействия на здоровье человека.

В соответствии с действующими санитарными нормами, предельно допустимые концентрации (ПДК) для железа и марганца в питьевой воде установлены для минимизации их воздействия на здоровье человека (ПДК Fe – 0,3 мг/дм³, Mn – 0,1 мг/дм³) [15]. В районе Тюменской городской агломерации наблюдается превышение ПДК: в 10 и больше раз для железа в воде из скважин и в 2 раза и более для марганца [3, 16, 17]. Такая ситуация обуславливает необходимость оценки рисков для здоровья населения, особенно при употреблении воды из нецентрализованных источников водоснабжения [18–20].

В данной статье рассматриваются результаты оценки рисков для здоровья населения при употреблении воды с повышенным содержанием железа и марганца. Методом Монте-Карло анализируется вариативность их распределения. Метод Монте-Карло позволяет учитывать неопределённости, связанные с изменчивостью концентраций загрязняющих веществ, различиями в потреблении воды, вариацией коэффициента поглощения и разницей во времени употребления поллютанта. Расчёт индекса опасности (Hazard Quotient – HQ) позволяет определить уровень риска для здоровья, связанный с воздействием химических веществ, и оценить возможные последствия превышения допустимых значений [21–23].

Тюменская область расположена в юго-западной части Западной Сибири, на границе с Уральскими горами, на территории Российской Федерации. Административным центром Тюменской области является город Тюмень. Опробование проводилось на западе Тюменской области, в районе Тюменской городской агломерации (рис. 1).

(I, IaQ_{II}), сложенный пылеватыми песками и алевритами с прослоями глин, с разнотекстурными песками в основании, мощностью 20–30 м. Питание происходит за счет атмосферных осадков [28, 29]. Воды четвертичных водоносных горизонтов тесно связаны с болотными водами [25, 30]. На водоразделах обычно представлен нижнеолигоценовый (куртамышский) водоносный горизонт (P₃kr), сложенный кварцевыми песками континентальных (пресноводно-озерных и дельтовых) и прибрежно-морских отложений мощностью до 20–30 м, перекрытый маломощной толщей субаэральных образований. В нижних частях разреза куртамышской свиты залегают глины со стяжениями марказита и пирита. По условиям залегания воды относятся к грунтовым с соответствующими областями питания, стока и гидрохимическим режимом. Формирование локальных напорных областей возможно там, где этот горизонт перекрыт четвертичными водоносными горизонтами, которые подстилают локальные водопоры – отложения глин и суглинков. На правом берегу р. Пышмы локальное распространение имеет неоген-четвертичный аллювиальный и озерный водоносный горизонт (a, IN-Q), сложенный песками, алевритами и глинами, водоносными являются слои песков мощностью до 1,2 м. Подстилает перечисленные водоносные горизонты эоценовый (ирбитско-тавдинский) водопорный региональный горизонт (P₂ir-tv), сложенный отложениями ирбитской и тавдинской свит, состоящими из диатомовых, диатомитовых и монтмориллонитовых глин общей мощностью более 200 м [27, 29]. В отложениях тавдинской свиты, которая непосредственно подстилает водоносные горизонты палеогенового и четвертичного возраста, повсеместно встречаются прослои сидеритов и стяжения марказита.

Порово-пластовые подземные воды в пойме и в пределах аллювиальных террас и локальных водоразделов относятся к незащищенным или слабозащищенным, мощность зоны аэрации составляет 2–5 м, она сложена пойменными и аллювиальными супесями и суглинками с галькой и гравием, характеризующимися высокой водопроницаемостью (коэффициент фильтрации 1,0–1,8 м/сут) [28, 29].

Основным выводом из вышесказанного является то, что существует тесная гидравлическая связь верхних водоносных горизонтов с болотными и поверхностными водами, что определённо оказывает влияние на формирование железомарганцевой аномалии в изучаемых питьевых водах.

Уровень антропогенного загрязнения в области относительно низкий, однако вблизи промышленных объектов и нефтегазовых месторождений может наблюдаться локальное загрязнение (ионы тяжёлых металлов, их сульфаты и соли). К значимым техногенным объектам в черте тюменской город-

ской агломерации можно отнести бывшие золоотвалы ТЭЦ-1 на правом берегу р. Туры [28, 30]. Данные объекты находятся в Тюменской области, но далеко от рассматриваемой территории.

Методы

Отбор и анализ проб воды

Исследовался химический состав (132 пробы) воды из действующих частных скважин и колодцев (нецентрализованные источники водоснабжения) в населённых пунктах, которые находятся на западе Тюменской области, в районе г. Тюмени (рис. 1). Отбор был проведён в соответствии с методическими рекомендациями [31]. Пробы отбирались каждый месяц в течение года. Была отобрана вода из действующих частных скважин и колодцев на территории частных домовладений, используемая в питьевых целях. Глубина скважин, ставших объектом исследования, составляла до 20 м, из чего можно сделать вывод о том, что водоснабжение производится из водоносных горизонтов верхне-оплейстоценово-голоценового и среднеоплейстоценового возраста, а в районе локальных водоразделов – из куртамышского водоносного горизонта.

Отбор проб воды осуществлялся в период с 2018 по 2022 гг. в рамках исследований, проводимых Научно-исследовательским институтом экологии и рационального использования природных ресурсов Тюменского государственного университета. Был проведён количественный химический анализ (КХА). Анализируемые параметры включали общее железо, определяемое фотометрическим методом с использованием сульфосалициловой кислоты, марганец, определяемый методом фотоколориметрии. Перманганатная окисляемость (Permanganate Index – PI) определялась методом окислительно-восстановительного титрования, и pH измерялся методом потенциометрии.

Статистическая обработка данных

Для оценки нормальности распределения выборки был проведён описательный статистический анализ, F-тест, рассчитаны среднее геометрическое, минимальная и максимальная концентрации, а также стандартное отклонение. Стандартное отклонение использовалось для отражения степени дискретности в распределении концентраций различных элементов. Для оценки корреляционных связей между изучаемыми показателями использовали непараметрический коэффициент ранговой корреляции Спирмена, коэффициент корреляции Пирсона и факторный анализ. Проводился расчёт превышения показателя ПДК:

$$CC = \frac{C_i}{ПДК_i},$$

где C_i – концентрация химического вещества i , мг/л; $ПДК_i$ – ПДК химического вещества i , мг/л.

Оценка риска для здоровья человека

Неканцерогенный риск – это риск возникновения вредных эффектов для здоровья человека, не связанных с развитием злокачественных опухолей (рака), при воздействии химических веществ [32]. Метод HQ рекомендован в международной практике оценки рисков. Он позволяет сравнивать результаты исследований с мировыми стандартами (Руководства Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ) по качеству питьевой воды, Директива о питьевой воде (Council Directive 98/83/EC) и т.д.).

HQ используется для оценки долговременного воздействия химических веществ, что актуально для анализа воды, поскольку её потребление является регулярным.

Для оценки неканцерогенного риска для здоровья человека, связанного с употреблением воды с повышенным содержанием железа и марганца, была использована модель коэффициента опасности HQ, разработанная Агентством по охране окружающей среды США [33]:

$$HQ = \frac{CDI}{RfD},$$

где CDI (Chronic Daily Intake) – хроническая суточная доза (мг/л_{день}); RfD (Reference dose) – референсная (безопасная) доза (мг/л_{день}).

Неканцерогенный риск для здоровья человека оценивался для хронического перорального поступления Fe и Mn с питьевой водой. RfD была определена в соответствии с руководством Р 2.1.10.1920-04 (2004) (табл. 1). Среднесуточная доза рассчитывалась по методике из [33]:

$$CDI = \frac{C \times WI \times EF \times ED}{BW \times AT}.$$

где C – концентрация Fe, Mn (мг/л); WI (Water Intake) – потребление воды (л/день), целевое референсное значение установлено на уровне 2 л/день [34]; EF (Exposure Frequency) – частота воздействия (дней/год), установленное значение – 350 дней/год согласно [34]; ED (Exposure Duration) – продолжительность воздействия (лет), в [34] рекомендуется 30 лет для взрослого жителя, учитывая миграцию населения; BW (Body Weight) – масса тела (кг), принятые значения – 83 и 73 кг для взрослых мужчин и женщин, соответственно, по данным отчета Росстата за 2023 год; AT (Average Time) – время усреднения (дней), рассчитывается как $ED \times 365$ дней.

В работе принимается, что значения HQ ниже референсного уровня 1 не связаны с неблагоприятными последствиями для здоровья [33]. Риски для здоровья возрастают пропорционально увеличению значений HQ выше 1.

Таблица 1. Референтная (безопасная) доза (RfD) для определения коэффициента опасности, мг/кг*день

Table 1. Reference (safe) dose (RfD) for determining the hazard quotient, mg/kg*day

Химический элемент/Chemical element	RfD
Mn	0,14
Fe	0,30

Симуляция Монте-Карло

Для оценки возможного диапазона значений HQ, который характеризует риск для здоровья человека при воздействии химических веществ, использовалась симуляция Монте-Карло. Этот метод позволил смоделировать неопределенность и вариации ключевых параметров и оценить возможные риски в условиях неопределенности. Неканцерогенный риск оценивался как вероятность того, что воздействие загрязнителя превысит безопасный уровень.

Для выполнения симуляции Монте-Карло в расчёте оценки неканцерогенного риска использовались следующие параметры:

- массовая концентрация Fe и Mn в воде, распределение логнормальное;
- объем потребляемой воды на 1 кг массы тела в день (л/кг веса), логнормальное распределение, 30 мл на 1 кг веса;
- масса тела человека от 73 кг до 83 кг;
- коэффициент усвоения вещества, значение варьируется от 0,1 до 0,5, вводится в модель для учёта того, что организм может усваивать химические элементы, такие как марганец и железо, с разной эффективностью;
- частота воздействия 350 дней в году, с учётом отпусков и других факторов;
- продолжительность воздействия 30 лет.

Принято, что

- 1) концентрация вещества следует логнормальному распределению, что позволяет учесть широкий диапазон возможных значений, включая редкие высокие концентрации [35];
- 2) масса тела и коэффициент усвоения описываются равномерным распределением, что отражает равновероятное распределение значений в пределах заданных диапазонов.

Для выполнения симуляции Монте-Карло генерируется большое количество случайных значений для каждого из параметров. В данном исследовании было выполнено 10000 итераций. Большое число повторений обеспечивает статистически значимую выборку, что позволяет сгладить случайные отклонения и получить достоверные оценки вариации риска. Эти случайные значения используются для расчёта CDI, которая выражает количество за-

грязнителя, поглощаемого человеком в течение дня.

На основе значений CDI для каждой итерации вычисляется HQ, который представляет собой отношение получаемой дозы загрязнителя к допустимой дозе (RfD). $HQ > 1$ указывает на превышение безопасного уровня воздействия, что свидетельствует о потенциальной опасности для здоровья.

После выполнения всех итераций анализируется распределение значений HQ. Рассчитываются такие метрики, как среднее значение, медиана, минимальные и максимальные значения, а также процентильные оценки (например, 95-й процентиль) для оценки вероятности возникновения высоких значений риска.

Для понимания, какие из входных параметров оказывают наибольшее влияние на риск, проводится анализ чувствительности. Это помогает определить, на какие факторы следует обращать больше внимания при разработке мер по управлению рисками.

Подробные параметры симуляции, включая входные распределения, код для выполнения симуляции и анализа чувствительности результата к входным параметрам (язык программирования Python), значения параметров, приводятся ниже.

Код для выполнения симуляции Монте-Карло, язык программирования Python:

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
C_mean=0,4 для Mn, 3,3 для Fe
std_dev_C=0,06 для Mn, 7,7 для Fe
WI_mean=30/1000
WI_std=10/1000
EF=350
ED=30
BW_min=73
BW_max=83
AT=ED*365
RfD=0,14 для Mn, 0,3 для Fe
AF_min=0,1
AF_max=0,5
iterations=10000
BW_sample=np.random.uniform(BW_min, BW_max,
iterations)
C_sample=np.random.lognormal(np.log(C_mean),
np.log(1 + std_dev_C/C_mean), iterations)
WI_sample=np.random.lognormal(np.log(WI_mean),
np.log(1+WI_std/WI_mean), iterations) * BW_sample
# потребление воды
AF_sample=np.random.uniform(AF_min, AF_max,
iterations)
CDI=(C_sample*WI_sample*EF*ED *
AF_sample)/(BW_sample*AT)
HQ=CDI/RfD
print(f"Mean HQ: {np.mean(HQ)}")
print(f"Median HQ: {np.median(HQ)}")
```

```
print(f"95th Percentile HQ: {np.percentile(HQ, 95)}")
print(f"Min HQ: {np.min(HQ)}")
print(f"Max HQ: {np.max(HQ)}")
plt.hist(HQ, bins=50, edgecolor='black', alpha=0,7)
plt.title('Distribution of HQ (Hazard Quotient)')
plt.xlabel('HQ')
plt.ylabel('Frequency')
plt.yscale('log')
plt.grid(True)
plt.show()
```

Код для анализа чувствительности результата к входным параметрам для частоты значений HQ, язык программирования Python:

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from scipy.stats import spearmanr
C_mean=0,4 для Mn, 3,3 для Fe
std_dev_C=0,06 для Mn, 7,7 для Fe
WI_mean=30/1000
WI_std=10/1000
EF_mean=350
EF_std=20
ED_mean=30
ED_std=5
BW_min=73
BW_max=83
AT=ED_mean*365
RfD=0,14 для Mn, 0,3 для Fe
AF_min=0.1
AF_max=0,5
iterations=10000
BW_sample=np.random.uniform(BW_min, BW_max,
iterations)
C_sample=np.random.lognormal(np.log(C_mean),
np.log(1+std_dev_C / C_mean), iterations)
WI_sample=np.random.lognormal(np.log(WI_mean),
np.log(1+WI_std / WI_mean), iterations)*BW_sample
# потребление воды
AF_sample=np.random.uniform(AF_min, AF_max,
iterations)
EF_sample=np.random.normal(EF_mean, EF_std, iterations) # частота воздействия (дни в году)
ED_sample=np.random.normal
```

Результаты и обсуждение

Статистический анализ данных

Отмечаются превышения ПДК по содержанию железа и марганца в воде нецентрализованных источников водопользования.

Среднее значение концентрации Fe в воде скважин на порядок превышает ПДК, установленное для вод источников питьевого водоснабжения, средняя концентрация Mn превышает ПДК в 4 раза (табл. 1). Для всех параметров выборки характерен высокий показатель стандартного отклонения, что, возможно, говорит о неоднородности химического состава воды (табл. 2).

Таблица 2. Статистический анализ химического состава воды из нецентрализованных источников водоснабжения

Table 2. Statistical analysis of chemical composition of water from non-centralized water supply sources

N	Среднее геометрическое/Geometric mean, sd			
	Fe, мг/л (mg/l), ПДК/МРС – 0,3 мг/л (mg/l)	Mn, мг/л (mg/l), ПДК/МРС – 0,1 мг/л (mg/l)	pH, ед. pH ПДК/МРС 6–9	PI, мг/л (mg/l) ПДК/МРС 7,0
132	3,3; 7,7	0,4; 0,06	7; 0,6	2,8; 1,7

Примечание: sd. – стандартное отклонение, ПДК – предельно допустимая концентрация, PI – перманганатная окисляемость.

Note: sd. – standard deviation, MPC – maximum permissible concentration, PI – permanganate index.

Расчёт коэффициента корреляции Спирмена показывает, что в воде из нецентрализованных источников водоснабжения наблюдается зависимость ($r > 0,4$) между PI, содержанием Fe и Mn, а также отрицательная корреляция между содержанием Mn и показателем pH. Данные зависимости между Mn и Fe, а также между PI и Fe подтверждаются результатами факторного анализа.

Оценка неканцерогенного риска для здоровья человека

Результаты расчёта коэффициента опасности представлены в табл. 3. Значение HQ не превышает 1, что свидетельствует о низком уровне неканцерогенного риска для здоровья населения. Результаты согласуются с полученными ранее значениями [36]. Моделирование методом Монте-Карло показало, что в воде из нецентрализованных источников водоснабжения для подавляющего большинства случаев (до 95 % симуляций) риск воздействия Fe, Mn не превышает безопасного уровня ($HQ < 1$) (рис. 2, 3, табл. 4).

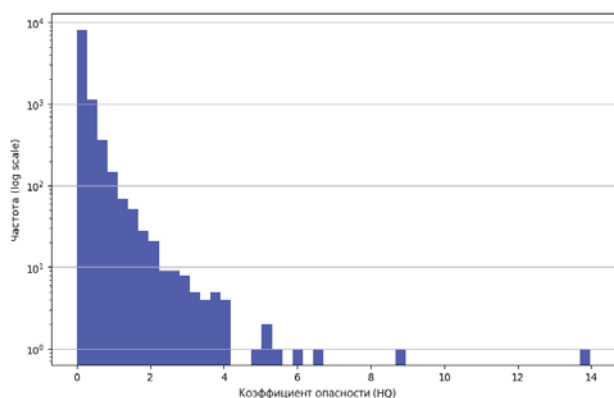


Рис. 2. Распределение HQ для здоровья человека, рассчитанных относительно концентрации Fe в воде из нецентрализованных источников водоснабжения, Lg

Fig. 2. HQ distribution for human health calculated with respect to Fe concentration from non-centralized water supply sources, Lg

Однако около 5 % случаев могут представлять риск выше допустимого уровня ($HQ > 1$). 5 % смоделированных концентраций, превышающих поро-

говое значение HQ, указывают на повышенные риски для здоровья определённых групп населения, обусловленные индивидуальными вариациями в потреблении воды, весе и других факторах, а также возможным влиянием сезонных изменений и локальных источников загрязнения [32].

Таблица 3. Величина HQ для здоровья населения

Table 3. HQ value for public health

Химический элемент Chemical element	Вода из скважин Well water
Fe	0,12
Mn	0,03

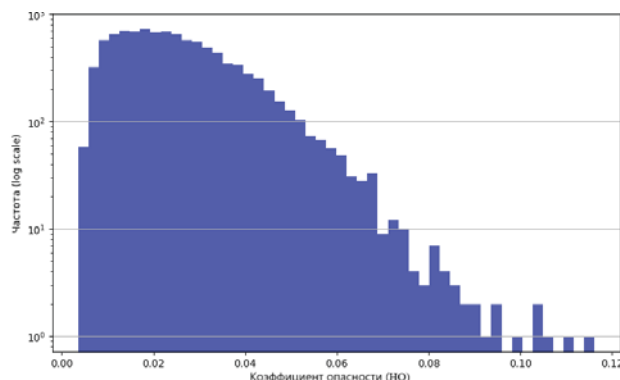


Рис. 3. Распределение HQ для здоровья человека, рассчитанных относительно концентрации Mn в воде из нецентрализованных источников водоснабжения, Lg

Fig. 3. HQ distribution for human health calculated with respect to Mn concentration from non-centralized water supply sources, Lg

Таблица 4. Статистические данные распределения HQ на основе проведённого моделирования

Table 4. Statistical data of HQ distribution based on the modelling performed

Величина/Value	Fe	Mn
Ср. арифметическое/Mean HQ	0,2	0,03
Медиана/Median HQ	0,1	0,02
95-й процентиль/95th Percentile HQ	0,8	0,05
Мин./Min HQ	0,001	0,004
Макс./Max HQ	9,9	0,09

В воде из нецентрализованных источников водоснабжения (рис. 2) риск для здоровья от попадания Fe в организм выше. Отмечается максимальное значение HQ, которое для железа превышает 10 (рис. 2).

Оценка чувствительности результата к входным параметрам

Проведённый анализ чувствительности (табл. 5, рис. 4, 5) демонстрирует взаимосвязи для Fe, Mn между различными параметрами и HQ.

Таблица 5. Анализ чувствительности результата к входным параметрам для Fe, Mn

Table 5. Sensitivity analysis to input parameters for Fe, Mn

Показатель Value	Fe, корреляция Спирмена Spearman correlation	Mn, корреляция Спирмена Spearman correlation
Концентрация/Concentration (C)	0,9	0,3
Масса тела/Body Weight (BW)	–0,02	–0,01
Потребление воды Water Intake (WI)	0,2	0,5
Коэффициент поглощения Absorption Factor (AF)	0,32	0,8
Частота воздействия Exposure Frequency (EF)	0,04	0,1
Продолжительность воздействия Exposure Duration (ED)	–0,01	–0,02

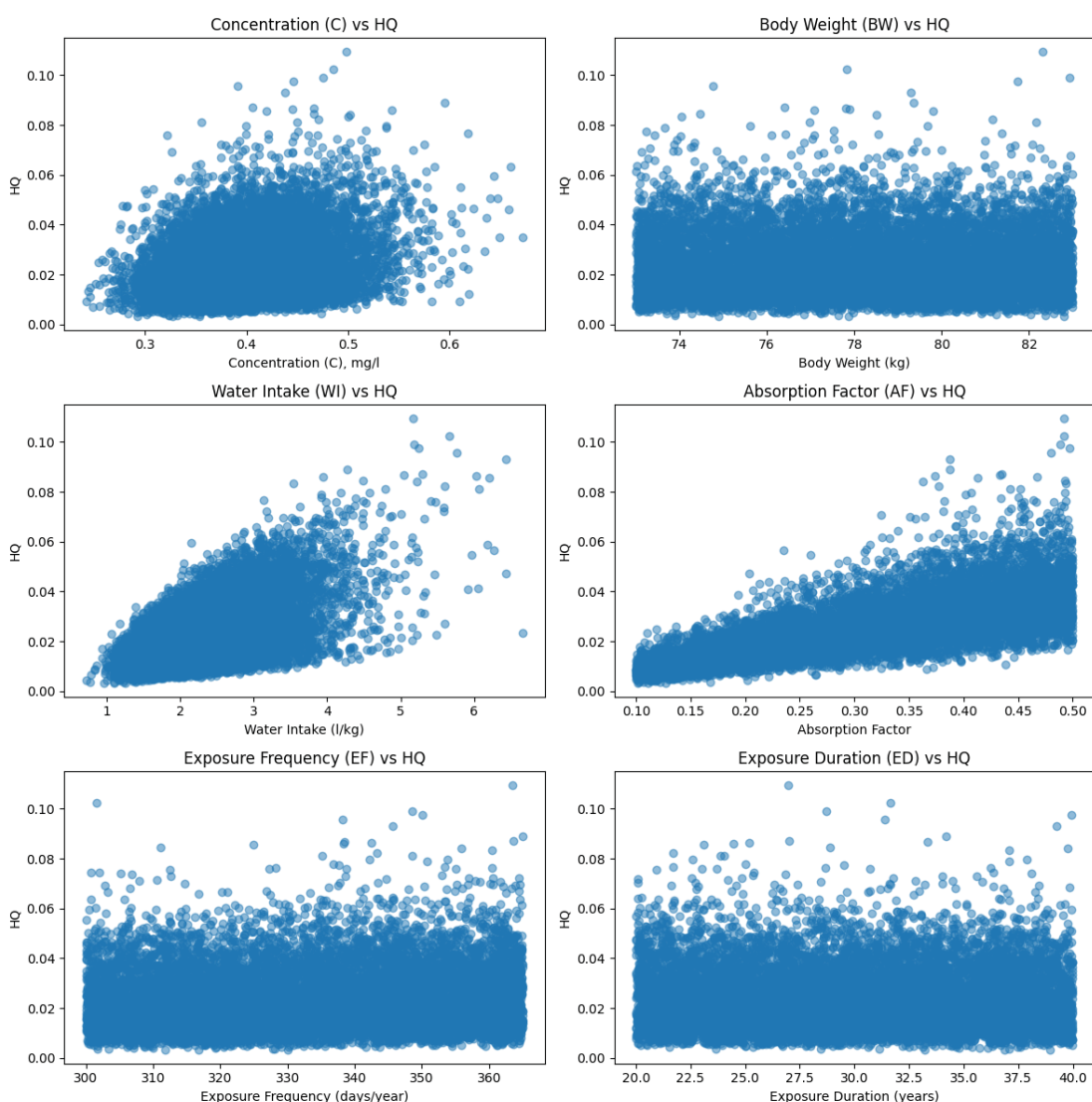


Рис. 4. Визуализация анализа чувствительности результата к входным параметрам для симуляции распределения значений HQ, Mn в воде из нецентрализованных источников водоснабжения

Fig. 4. Visualization of sensitivity analysis results for HQ simulation of values distribution, Mn in water from decentralized water supply sources

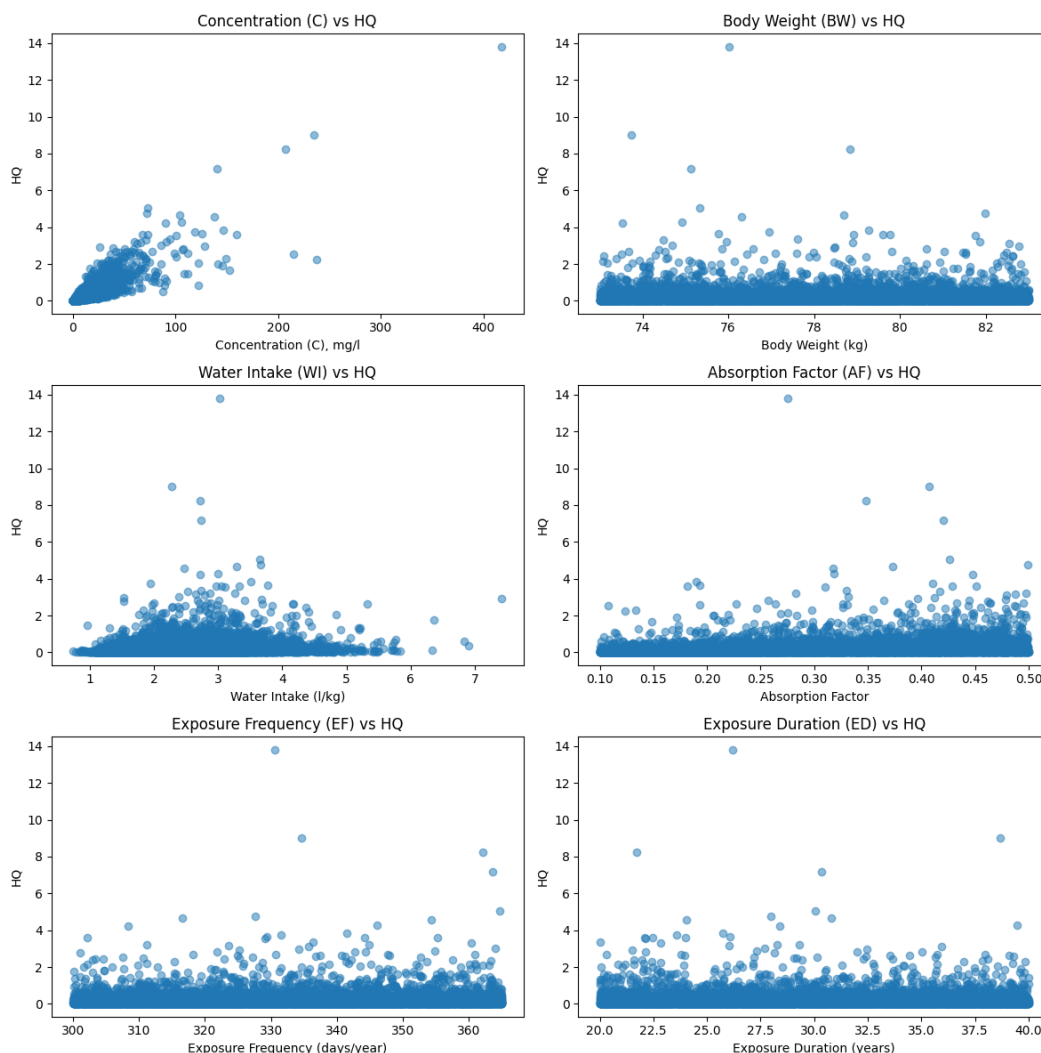


Рис. 5. Визуализация анализа чувствительности результата к входным параметрам для симуляции распределения значений HQ, Fe в воде из нецентрализованных источников водоснабжения

Fig. 5. Visualization of sensitivity analysis results for HQ simulation values distribution, Fe in water from decentralized water supply sources

1. Очень высокая корреляция для Fe (0,9), что указывает на сильное влияние концентрации железа на HQ. Для Mn корреляция слабее (0,3), но все же положительная, что также отражает влияние концентрации марганца на значение коэффициента опасности.
2. Масса тела человека имеет очень слабое влияние на величину HQ для Fe и Mn, о чем свидетельствует низкий коэффициент корреляции (–0,02 и –0,01).
3. С потреблением воды для Mn наблюдается умеренная положительная корреляция (0,5), что говорит о заметном влиянии потребления воды на HQ для марганца. В случае Fe влияние слабее (0,2), но также положительное.
4. Высокий коэффициент усвоения значительно повышает HQ для марганца (0,8). Для Fe корреляция тоже положительная, но слабая (0,3).
5. Параметр частоты воздействия имеет слабое влияние на величину HQ как для Fe (0,04), так и для Mn (0,1), что говорит о том, что изменение частоты потребления воды (в днях) в пределах одного года незначительно сказывается на рисках. Таким образом, концентрация Fe и Mn оказывает наибольшее влияние на HQ для этих металлов.

Источники и факторы накопления Fe и Mn в подземных водах

В процессе оценки неканцерогенного риска для здоровья человека было установлено, что концентрация Fe и Mn является одним из ключевых факторов, определяющих HQ. Регрессия между концентрациями Fe, Mn и HQ указывает на необходимость контроля содержания металлов в воде.

Зависимость между содержанием Fe и величиной перманганатной окисляемости опосредованно

подтверждает, что железо присутствует в воде в форме органоминеральных комплексов [37]. Железо образует устойчивые комплексы с органическими веществами гумусового ряда, которые удерживают его в растворенной форме [38]. Органические лиганды связывают большое количество Fe (II), положительно влияя на биодоступность железа в воде, причём карбоксильные группы играют основную роль при кислых и нейтральных pH [39]. Однако Fe в воде может также катализировать окислительные процессы, что влияет на значение перманганатной окисляемости [40].

Таким образом, регрессия между железом и значением перманганатной окисляемости может быть обусловлена как образованием органоминеральных комплексов, так и каталитической активностью железа, которое само по себе как переменного валентный элемент может определять окислительно-восстановительный потенциал системы.

Однако в районе исследований распространяются болотные воды с повышенным содержанием растворённого органического вещества (до 122 мг/л по данным весенне-летних полевых наблюдений на Тарманском болоте в 2024 г.). Эти воды имеют тесную гидравлическую взаимосвязь с грунтовыми водами. Поэтому первый вариант является более вероятным.

Марганец также склонен образовывать органоминеральные комплексы, но в меньшей степени, чем Fe [41], т. е. в первую очередь органические лиганды будут связываться с Fe, а оставшиеся свободные лиганды – с Mn и другими металлами. Однако стоит отметить, что Mn способен накапливаться в воде даже в окислительных условиях, в отличие от Fe, которое осаждается в виде гидроксидов [14]. Отрицательная корреляция между концентрацией Mn и величиной pH говорит о том, что Mn максимально растворим в кислой среде, где он присутствует в форме Mn^{2+} . При повышении pH Mn может переходить в нерастворимые формы, такие как карбонаты, оксиды и гидроксиды, осаждающиеся из раствора [42].

На западе Тюменской области, несмотря на значительные масштабы осушительной мелиорации болот [43], по-прежнему имеются заболоченные участки, представленные в основном пойменными и притеррасными низинными болотами, что влияет на накопление металлов в водоёмах и подземных водах района [16, 37]. Восстановительные условия, которые обычно присущи болотным системам, способствуют накоплению растворённого органического вещества [44]. Формирование органоминеральных комплексов увеличивает миграционную способность железа в воде, поддерживая его концентрацию в растворенной форме [45]. А нейтральный характер pH болотных вод низинных болот не препятствует накоплению Mn, который в

целом более устойчив в растворенной форме марганца, чем железо, и способен накапливаться даже в окислительных условиях [14].

Таким образом, можно сделать вывод о том, что повышенные концентрации Fe и Mn поступают в природные воды исследуемого района благодаря гидравлической связи болотных и поверхностных вод и вод четвертичных отложений, которые используются для нецентрализованного водоснабжения. В свою очередь болотные и поверхностные воды района исследований характеризуются благоприятными геохимическими условиями для накопления этих элементов. В случае, когда источником водоснабжения выступает куртамышский водоносный горизонт, в качестве источника Fe могут выступать пирит и марказит из вмещающих отложений, а также сидерит и марказит тавдинской свиты, подстилающей водовмещающие отложения куртамышской свиты.

Заключение

Железомарганцевая геохимическая аномалия на территории западной части Тюменской области, в районе г. Тюмени, оказывает влияние на состав питьевой воды, что в свою очередь может влиять на здоровье населения. Выявленные превышения предельно допустимых концентраций железа и марганца в воде из нецентрализованных источников водоснабжения обуславливают необходимость оценки неканцерогенных рисков от потребителей данной воды.

Рассчитанный коэффициент опасности показал, что в среднем риск для здоровья населения остаётся низким. Однако в 5 % случаев коэффициент опасности приближается к пороговому значению, что свидетельствует о потенциальной угрозе для здоровья и требует выявления факторов, оказывающих наибольшее влияние на значения коэффициента опасности для разработки мер по управлению рисками.

Метод Монте-Карло, использованный для оценки вариативности и чувствительности модели оценки рисков, позволил учесть неопределённости, связанные с изменчивостью концентраций химических элементов, различиями в потреблении воды и другими факторами.

Анализ чувствительности результатов к входным параметрам показал, что определяющими факторами для показателя коэффициента опасности являются концентрации элементов и их усвоение, тогда как масса тела, частота и длительность воздействия оказывают менее заметный эффект. Также важным аспектом является объём ежедневно потребляемой воды. Это подчеркивает необходимость регулярного контроля содержания железа и марганца в питьевой воде, так как их уровни значи-

тельно изменяются под воздействием геохимических условий (например, pH, Eh, концентрации карбонат-ионов, растворенного кислорода и органического вещества).

Для снижения потенциальных рисков для здоровья важно не только наладить постоянный мониторинг качества воды, но и разработать меры по

уменьшению содержания железа и марганца в централизованных системах водоснабжения. Управление рисками требует комплексного подхода, включающего контроль концентраций металлов и сопутствующих характеристик, таких как pH, общее химическое состояние, содержание органических веществ и растворенного кислорода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Akter S. et al. Probabilistic human health risk assessment of Fe, As and Mn in the groundwater of Dhamrai Upazila, Dhaka, Bangladesh // *J Sci Res Rep*. – 2021. – Vol. 1. – № 4 – P. 1–11.
2. Jiang X. et al. Comprehensive analysis of the association between human diseases and water pollutants // *Int J Environ Res Public Health*. – 2022. – Vol. 19. – № 24. – P. 16475.
3. Жиляков Е.В., Монахова С.А., Гузеева С.А. Анализ геоэкологической ситуации в водных объектах Тюменской области и города Тюмени // *Успехи современного естествознания*. – 2019. – Т. 5. – С. 47–52.
4. Ермакова Н.А. и др. Гидрохимическое состояние тюменских источников хозяйственно-питьевого водоснабжения в весенне-летний период // *Вестник ТЮГУ. Экология и природопользование*. – 2014. – Т. 12. – С. 138–149.
5. Корчина Т.Я. и др. Сравнительные показатели содержания железа и марганца в волосах у женщин северного региона с различной очисткой питьевой воды // *Экология человека*. – 2018. – № 4. – С. 4–9.
6. Никулин Д.А., Ламанова Т.В. Сравнение степени загрязнения водоёмов Тюменской области // *Инновационные научные исследования: теория, методология, практика*. – Пенза: МЦНС «Наука и Просвещение», 2018. – С. 265–268.
7. Корниенкова А.А., Акатьева Т.Г. Качество воды рек иртышского бассейна в пределах Тюменской области // *Достижения молодежной науки для агропромышленного комплекса: Сборник трудов LVII научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных*. – Тюмень: Государственный аграрный университет Северного Зауралья, 2023. – С. 233–238.
8. Sharma N. et al. Heavy metal pollution: Insights into chromium eco-toxicity and recent advancement in its remediation // *Environ Nanotechnol Monit Manag*. – 2021. – Vol. 15. – P. 100388.
9. Kleyn S.V., Vekovshina S.A. Priority risk factors related to drinking water from centralized water supply system that create negative trends in population health // *Health Risk Analysis*. – 2020. – № 3. – P. 49–60.
10. WHO. 2011. Guidelines for Drinking-water Quality, 4th ed. – Geneva: World Health Organization, 2017. URL: <https://www.epa.gov/> (дата обращения: 13.12.2024).
11. Rahman Md.A. et al. Manganese in potable water of nine districts, Bangladesh: human health risk // *Environmental Science and Pollution Research*. – 2021. – Vol. 28. – № 33. – P. 45663–45675.
12. Tan H. et al. Human health risk assessment of elevated Fe and Mn intake in groundwater in Yangtze Catchment // *Groundwater*. – 2024. – Vol. 62. – № 2. – P. 226–235.
13. Olivier-Lauquet G. Release of trace elements in wetlands: role of seasonal variability // *Water Res*. – 2001. – Vol. 35. – № 4. – P. 943–952.
14. Крайнов С.Р., Рыженко Б.Н., Швецов В.М. Геохимия подземных вод. Теоретические, прикладные и экологические аспекты. – М.: ЦентрЛитНефтеГаз, 2012. – 672 с.
15. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания // СанПиН 1.2.3685-21. – М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2021. – 988 с.
16. Таирова А.Р., Мухамедьярова Л.Г., Козьяр Ю.В. Оценка экологического состояния реки Туры в условиях антропогенного воздействия // *Вестник НЦ БЖД*. – 2015. – № 4 (26). – С. 138–141.
17. Акатьева Т.Г. Санитарно-гигиеническая характеристика питьевой воды г. Тюмени // *Вестник Государственного аграрного университета Северного Зауралья*. – 2016. – № 4 (35). – С. 6–13.
18. Янкович Е.П. и др. Химический состав подземных вод как фактор риска для здоровья населения (на примере Томского района Томской области) // *Современные проблемы науки и образования*. – 2014. – № 3. – С. 786–794.
19. Ashar Y.K. et al. Iron (Fe) content in community well water around Mabarrat Industrial Area Market 3 Bantenan Medan City in the perspective of health and Islamic // *Contagion: Scientific Periodical Journal of Public Health and Coastal Health*. – 2023. – Vol. 5. – № 1. – P. 294.
20. Matveeva V.A. et al. Manganese pollution in mining-influenced rivers and lakes: current state and forecast under climate change in the Russian Arctic // *Water (Switzerland)*. MDPI. – 2022. – Vol. 14. – № 7. – P. 1091–1113.
21. Marufi N. et al. Carcinogenic and non-carcinogenic human health risk assessments of heavy metals contamination in drinking water supplies in Iran: a systematic review // *Rev Environ Health*. – 2024. – Vol. 39. – № 1. – P. 91–100.
22. Shafuddin Ahmed A.S. et al. Human health risk assessment of heavy metals in water from the subtropical river, Gomti, Bangladesh // *Environ Nanotechnol Monit Manag*. – 2021. – Vol. 15. – P. 100416.
23. Mahato M.K. et al. Risk assessment due to intake of metals in groundwater of East Bokaro Coalfield, Jharkhand, India // *Expo Health*. – 2016. – Vol. 8. – № 2. – P. 265–275.
24. Гузеева С.А., Огороднова Ю.В. Динамика изменения концентрации нефтепродуктов в реке Тура в пределах жилой территории города Тюмени // *Инновации и инвестиции*. – 2019. – № 10. – С. 207–210.
25. Схема «Водоотведение поверхностных вод с территории садоводческих обществ, расположенных на Тарманском болотном массиве Тюменской области». – Тюмень: Тюменский индустриальный университет, 2001. – Т. 2. – № 1. – 134 с.
26. Материалы рекогносцировочной разведки торфяного месторождения (зап. часть) «Тарманское», расположенного в Тюменском-Велижанском районах Тюменской области. – Тюмень: Тюменский индустриальный университет, 1949. – 30 с.

27. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1000000 (третье поколение). Карта доплиоценовых образований. Серия Уральская. Лист О-41 – Екатеринбург. – СПб: Картфабрика «ВСЕГЕИ», 2011. – 15 с.
28. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1000000 (третье поколение). Карта плиоцен-четвертичных образований. Серия Уральская. Лист О-41 – Екатеринбург. – СПб: Картфабрика «ВСЕГЕИ», 2011. – 15 с.
29. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1000000 (третье поколение). Серия Уральская. Лист О-41 – Екатеринбург. Объяснительная записка. – СПб: Картфабрика «ВСЕГЕИ», 2011. – 15 с.
30. Дополнительные материалы к предварительному очерку Тарманского торфяного массива Тюменской области. Министерство электростанций СССР. Главэнергопроект. – М.: Государственный проект института «ГИПРОТОРФ», 1955. – 33 с.
31. ГОСТ Р 59024-2020. Качество воды. Вода для централизованных систем питьевого водоснабжения. Гигиенические требования и контроль качества. – М.: Стандартинформ, 2020. – 16 с.
32. U.S. Environmental Protection Agency. Human Health Risk Assessment. – 2023. URL: <https://www.epa.gov/> (дата обращения: 10.10.2024).
33. United States Environmental Protection Agency. Risk Assessment Guidance for Superfund: Vol. I (Part D. Standardized Planning, Reporting, and Review of Superfund Risk Assessments). – Washington: US EPA, 1989. – 100 p.
34. Р 2.1.10.1920-04. Руководство по оценке риска для здоровья населения при воздействии химических веществ, загрязняющих окружающую среду. – М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2004. – 54 с.
35. Blackwood L.G. The lognormal distribution, environmental data, and radiological monitoring // *Environ Monit Assess.* – 1992. – Vol. 21. – № 3. – P. 193–210.
36. Лапшин А.П., Ванькова А.Н. Интегральная оценка качества питьевой воды // Анализ риска здоровью-2020 совместно с международной встречей по окружающей среде и здоровью Rise-2020 и круглым столом по безопасности питания: Материалы X Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. – Пермь: Пермский национальный исследовательский политехнический университет, 2020. – № 3. – С. 4–17.
37. Переладова Л.В. Экологическое состояние источников хозяйственно-питьевого водоснабжения г. Тюмени // *Вестник Тюменского государственного университета.* – 2011. – № 12. – С. 173–178.
38. Daugherty E.E. et al. Complexation and Redox Buffering of Iron (II) by Dissolved Organic Matter // *Environ Sci Technol.* – 2017. – Vol. 51. – № 19. – P. 11096–11104.
39. Lu C. et al. Carboxyl-polyethylene glycol-phosphoric acid: a ligand for highly stabilized iron oxide nanoparticles // *J Mater Chem.* – 2012. – Vol. 22. – № 37. – P. 19806.
40. Catrouillet C. et al. Geochemical modeling of Fe (II) binding to humic and fulvic acids // *Chem Geol.* – 2014. – Vol. 372. – P. 109–118.
41. Моисеенко Т.И. и др. Формы нахождения металлов в природных водах в зависимости от их химического состава // *Водные ресурсы.* – 2013. – Т. 40. – № 4. – С. 375–385.
42. Phukan B., Patel A.B., Mukherjee C. A water-soluble and water-coordinated Mn complex: synthesis, characterization and phantom MRI image study // *Dalton Transactions.* – 2015. – Vol. 44. – № 29. – P. 12990–12994.
43. Информационный портал ФГБНУ ВНИИ «Радуга» // Мелиоративные системы и гидротехнические сооружения. – 2024. URL: <https://inform-raduga.ru/gts> (дата обращения: 10.10.2024).
44. Сыпалов С.А. и др. Оценка загрязнения торфа некоторыми тяжелыми металлами в зависимости от глубины залегания // *Химия твердого топлива.* – 2020. – № 1. – С. 38–42.
45. Deng Y., Stumm W. Kinetics of redox cycling of iron coupled with fulvic acid // *Aquat Sci.* – 1993. – Vol. 55. – № 2. – P. 103–111.

Информация об авторах

Александра Игоревна Беляновская, кандидат геолого-минералогических наук, лаборант отделения геологии, Инженерная школа природных ресурсов, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, alexandra.belyanovskaya@outlook.com, <https://orcid.org/0000-0003-4320-7637>

Евгения Александровна Солдатова, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, Институт лесоведения РАН, Россия, 143030, с. Успенское, ул. Советская, 21, 2a61@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3967-4822>

Елизавета Вячеславовна Крестьянникова, аспирант отделения геологии, Инженерная школа природных ресурсов, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, li3452@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5512-1465>

Поступила в редакцию: 24.10.2024

Поступила после рецензирования: 09.12.2024

Принята к публикации: 24.12.2024

REFERENCES

1. Akter S. Probabilistic human health risk assessment of Fe, As and Mn in the groundwater of Dhamrai Upazila, Dhaka, Bangladesh. *J Sci Res Rep*, 2021, vol. 1, no. 4, pp. 1–11.
2. Jiang X. Comprehensive analysis of the association between human diseases and water pollutants. *Int J Environ Res Public Health*, 2022, vol. 19, no. 24, p. 16475.

3. Zhilyakov E.V., Monakhova S.A., Guzeeva S.A. Analysis of the geoecological situation in water bodies of the Tyumen region and the city of Tyumen. *Advances in Modern Natural Science*, 2019, vol. 5, pp. 47–52. (In Russ.)
4. Ermakova N.A. Hydrochemical state of Tyumen sources of household drinking water supply in the spring-summer period. *Bulletin of Tyumen State University. Ecology and Natural Resource Management*, 2014, vol. 12, pp. 138–149. (In Russ.)
5. Korchina T.Ya. Comparative indicators of iron and manganese content in the hair of women in the northern region with different drinking water purification. *Human Ecology*, 2018, no. 4, pp. 4–9. (In Russ.)
6. Nikulin D.A., Lamanova T.V. Comparison of the pollution level of water bodies in the Tyumen region. *Innovative Scientific Research: Theory, Methodology, Practice*. Penza, MCNS "Science and Enlightenment" Publ., 2018. pp. 265–268.
7. Kornienkova A.A., Akatieva T.G. Water quality of rivers in the Irtysh basin within the Tyumen region. *Achievements of Youth Science for the Agro-Industrial Complex. Proceedings of the LVII Scientific and Practical Conference of Students, Postgraduates, and Young Scientists*. Tyumen, State Agrarian University of Northern Ural Publ., 2023. pp. 233–238.
8. Sharma N. Heavy metal pollution: Insights into chromium eco-toxicity and recent advancement in its remediation. *Environ Nanotechnol Monit Manag*, 2021, vol. 15, pp. 100388.
9. Kleyn S.V., Vekovshina S.A. Priority risk factors related to drinking water from centralized water supply system that create negative trends in population health. *Health Risk Analysis*, 2020, no. 3, pp. 49–60.
10. WHO. 2011. *Guidelines for Drinking-water Quality*, 4th ed. Geneva, World Health Organization. 2017. Available at: <https://www.epa.gov/> (accessed: 13 December 2024).
11. Rahman Md.A. Manganese in potable water of nine districts, Bangladesh: human health risk. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, vol. 28, no. 33, p. 45663–45675.
12. Tan H. Human health risk assessment of elevated Fe and Mn intake in groundwater in Yangtze Catchment. *Groundwater*, 2001, vol. 62, no. 2, pp. 226–235.
13. Olivie-Lauquet G. Release of trace elements in wetlands: role of seasonal variability. *Water Res.*, 2001, vol. 35, no. 4, pp. 943–952.
14. Krainov S.R., Ryzhenko B.N., Shvets V.M. *Geochemistry of groundwater: theoretical, applied, and ecological aspects*. Moscow, TsentrLitNefteGaz Publ., 2012. 672 p.
15. SanPiN 1.2.3685-21. *Hygienic norms and requirements to ensure safety and (or) harmlessness for humans of habitat factors*. Moscow, Publ. House of Standards, 2021. 16 p.
16. Tairaova A.R., Mukhamedyarova L.G., Kozyar Yu.V. Assessment of the ecological state of the Tura River under anthropogenic impact. *Bulletin of the National Center for Environmental Safety*, 2015, no. 4, pp. 138–141. (In Russ.)
17. Akatieva T.G. Sanitary and hygienic characteristics of drinking water in Tyumen. *Bulletin of the State Agrarian University of Northern Ural*, 2016, vol. 4, no. 35, pp. 6–13. (In Russ.)
18. Yankovich E.P. Chemical composition of groundwater as a risk factor for public health (case study of Tomsk District, Tomsk Region). *Modern Problems of Science and Education*, 2014, no. 3, pp. 786–794. (In Russ.)
19. Ashar Y.K. Iron (Fe) Content in community well water around Mabar Hilir Industrial Area Market 3 Bantenan Medan City in the perspective of health and Islamic. *Contagion: Scientific Periodical Journal of Public Health and Coastal Health*, 2023, vol. 5, no. 1, p. 294.
20. Matveeva V.A. Manganese pollution in mining-influenced rivers and lakes: current state and forecast under climate change in the Russian Arctic. *Water (Switzerland)*. MDPI, 2022, vol. 14, no. 7, p. 1091–1113
21. Marufi N. Carcinogenic and non-carcinogenic human health risk assessments of heavy metals contamination in drinking water supplies in Iran: a systematic review. *Rev Environ Health*, 2024, vol. 39, no. 1, pp. 91–100.
22. Shafiuddin Ahmed A.S. Human health risk assessment of heavy metals in water from the subtropical river, Gomti, Bangladesh. *Environ Nanotechnol Monit Manag*, 2021, vol. 15, pp. 100416.
23. Mahato M.K. Risk assessment due to intake of metals in groundwater of East Bokaro Coalfield, Jharkhand, India. *Expo Health*, 2016, vol. 8, no. 2, pp. 265–275.
24. Guzeeva S.A., Ogorodnova Yu.V. Dynamics of changes in the concentration of petroleum products in the Tura River within the residential area of Tyumen. *Innovations and Investments*, 2019, no. 10, pp. 207–210. (In Russ.)
25. *Scheme for the drainage of surface water from the territory of gardening societies located on the Tarman peat massif, Tyumen Region*. Tyumen, Tyumen Industrial University Publ., 2001. Vol. 2, no. 1, p. 134. (In Russ.)
26. *Materials of reconnaissance survey of the Tarman peat deposit (part I) located in the Tyumen-Velizhansky districts of the Tyumen region*. Tyumen, Tyumen Industrial University Publ., 1949. 47 p. (In Russ.)
27. *State Geological Map of the Russian Federation. Scale 1:1000000 (Third Generation). Map of Pre-Pliocene Formations. Ural Series. Sheet O-41 – Yekaterinburg*. St Petersburg, VSEGEI Cartographic Factory Publ., 2011. 15 p.
28. *State Geological Map of the Russian Federation. Scale 1:1000000 (Third Generation). Map of Pliocene-Quaternary Formations. Ural Series. Sheet O-41 – Yekaterinburg*. St Petersburg, VSEGEI Cartographic Factory Publ., 2011. 15 p.
29. *State Geological Map of the Russian Federation. Scale 1:1000000 (Third Generation). Ural Series. Sheet O-41 – Yekaterinburg. Explanatory Notes*. St Petersburg, VSEGEI Cartographic Factory Publ., 2011. 15 p.
30. *Supplementary materials to the preliminary overview of the Tarman Peat Massif in the Tyumen Region*. Moscow, Ministry of Power Plants of the USSR. Main Energy Project. State Design Institute "GIPROTORG" Publ., 1955. 33 p.
31. SS R 59024-2020. *Water quality. Water for centralized drinking water supply systems. Hygienic requirements and quality control*. Moscow, Standartinform Publ., 2020. 16 p.
32. U.S. Environmental Protection Agency. *Human Health Risk Assessment*. 2023. Available at: <https://www.epa.gov/> (accessed: 10 October 2024).
33. United States Environmental Protection Agency. *Risk Assessment Guidance for Superfund: Vol. I (Part D. Standardized Planning, Reporting, and Review of Superfund Risk Assessments)*. Washington, US EPA, 1989. 100 p.
34. R 2.1.10.1920-04. *Guidance on assessing health risks from exposure to chemical substances contaminating the environment*. Moscow, Federal Center for Hygiene and Epidemiology of Rospotrebnadzor Publ., 2004. 54 p. (In Russ.)

35. Blackwood L.G. The lognormal distribution, environmental data, and radiological monitoring. *Environ Monit Assess*, 1992, vol. 21, no. 3, pp. 193–210.
36. Lapshin A.P., Vankova A.N. Integral assessment of drinking water quality. *Risk analysis to health-2020, in conjunction with the international meeting on the environment and health Rise-2020 and the round table on food safety. Proc. of the X All-Russian scientific and practical conference with international participation*. Perm, Perm National Research Polytechnic University Publ., 2020. No. 3, pp. 4–17. (In Russ.)
37. Pereladova L.V. Ecological state of sources of economic and drinking water supply in Tyumen. *Bulletin of Tyumen State University*, 2011, no. 12, pp. 173–178. (In Russ.)
38. Daugherty E.E. Complexation and Redox Buffering of Iron (II) by dissolved organic matter. *Environ Sci Technol*, 2017, vol. 51, no. 19, pp. 11096–11104.
39. Lu C. Carboxyl-polyethylene glycol-phosphoric acid: a ligand for highly stabilized iron oxide nanoparticles. *J Mater Chem*, 2012, vol. 22, no. 37, p. 19806.
40. Catrouillet C. Geochemical modeling of Fe (II) binding to humic and fulvic acids. *Chem Geol*, 2014, vol. 372, pp. 109–118
41. Moiseenko T.I. Forms of metal occurrence in natural waters depending on their chemical composition. *Water Resources*, 2013, vol. 40, no. 4, pp. 375–385. (In Russ.)
42. Phukan B., Patel A.B., Mukherjee C. A water-soluble and water-coordinated Mn complex: synthesis, characterization and phantom MRI image study. *Dalton Transactions*, 2015, vol. 44, no. 29, pp. 12990–12994.
43. *Information portal of the Federal State Budgetary Scientific Institution "Raduga". Meliorative systems and hydraulic structures*. 2024. Available at: <https://inform-raduga.ru/gts> (accessed: 10 October 2024).
44. Syapalov S.A. Assessment of peat contamination by some heavy metals depending on the depth of occurrence. *Chemistry of Solid Fuel*, 2020, no. 1, pp. 38–42. (In Russ.)
45. Deng Y., Stumm W. Kinetics of redox cycling of iron coupled with fulvic acid. *Aquat Sci.*, 1993, vol. 55, no. 2, pp. 103–111.

Information about the authors

Alexandra I. Belyanovskaya, Cand. Sc., Laboratory Assistant, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation; alexandra.belyanovskaya@outlook.com; <https://orcid.org/0000-0003-4320-7637>

Evgenia A. Soldatova, Cand. Sc., Senior Researcher, Institute of Forest Science, Russian Academy of Sciences, 21, Sovetskaya street, Uspenskoe, 143030, Russian Federation, 2a61@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3967-4822>

Elizaveta V. Krestyannikova, Postgraduate Student, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation; li3452@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0001-5512-1465>

Received: 24.10.2024

Revised: 09.12.2024

Accepted: 24.12.2024

УДК 628.4
DOI: 10.18799/24131830/2025/2/4632
Шифр специальности ВАК: 2.10

Разработка системы автоматической сортировки мусора на основе Arduino

Л.Н. Хасанова✉, П.Н. Скуратова, С.А. Мусина

Уфимский университет науки и технологий, Россия, г. Уфа

✉liyahasnovaa@mail.ru

Аннотация. Актуальность. Загрязнение окружающей среды мусором до сих пор остается одной из самых актуальных проблем современного мира. Важной частью ее решения является правильная сортировка мусора, которая позволяет снизить объем отходов, а также упрощает их переработку и утилизацию. Автоматическая сортировка мусора позволяет снизить использование ручного труда, а также возможность инфицирования работников. Проектирование автоматического классификационного мусорного бака позволит решить задачу сортировки уже на стадии образования отходов, ускоряя процесс обезвреживания. **Цель.** Автоматическое распознавание материала отходов и последующее распределение мусора по соответствующим контейнерам станет важным шагом в направлении создания более устойчивой и экологически чистой системы управления отходами. **Методы.** Разработка системы автоматической сортировки мусора на основе Arduino. При помощи датчиков Arduino обрабатывает полученные данные и отправляет команду исполнительному устройству на перемещение мусора в соответствующий контейнер. **Результаты и выводы.** Создано два прототипа системы сортировки мусора. Первый прототип был оснащен меньшим количеством датчиков, что снижало его способность точно различать типы мусора. После внесения значительных улучшений была развернута работа над вторым прототипом. Этот прототип отличается надежностью электронной обработки и может продуктивно функционировать в любых погодных условиях благодаря тщательно продуманному корпусу. Относительно высокая точность при тестировании показывает, что предложенная модель способна эффективно сортировать отходы, сокращая ручной труд и ускоряя процесс утилизации. Она имеет жизненно важное научное значение и прикладную ценность.

Ключевые слова: твердые коммунальные отходы, сортировка мусора, распознавание отходов, автоматическая сортировка отходов, Arduino

Для цитирования: Хасанова Л.Н., Скуратова П.Н., Мусина С.А. Разработка системы автоматической сортировки мусора на основе Arduino // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 2. – С. 66–78. DOI: 10.18799/24131830/2025/2/4632

UDC 628.4
DOI: 10.18799/24131830/2025/2/4632

Development of an Arduino-based automatic waste sorting system

L.N. Khasanova✉, P.N. Skuratova, S.A. Musina

Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russian Federation

✉liyahasnovaa@mail.ru

Abstract. Relevance. Environmental pollution by waste is still one of the most pressing problems of the modern world. An important part of its solution is the proper waste sorting, which reduces its volume, as well as simplifies its processing and disposal. Automatic waste sorting reduces the use of manual labor, as well as the possibility of infecting workers. Designing an automatic classification trash can solve the problem of waste sorting already at the stage of its generation, speeding up neutralization. **Aim.** Automatically recognizing the waste material and then assigning the trash to the appropriate bins will be an important step towards a more sustainable and environmentally friendly waste management system. **Methods.** Development of an Arduino-based automatic waste sorting system. Using sensors, the Arduino processes the received data and sends

a command to the executive device to move the waste to the appropriate container. **Results and conclusions.** Two prototypes of the waste sorting system were created. The first prototype was equipped with fewer sensors, which reduced its ability to accurately distinguish between waste types. After significant improvements, the work on the second prototype was deployed. This prototype is characterized by robust electronic processing and can function productively in all weather conditions due to its carefully designed housing. Relatively high accuracy in testing shows that the proposed model can sort waste efficiently, reducing manual labor and speeding up the recycling process. It has vital scientific significance and application value.

Keywords: municipal solid waste, waste sorting, waste recognition, automatic waste sorting, Arduino

For citation: Khasanova L.N., Skuratova P.N., Musina S.A. Development of an Arduino-based automatic waste sorting system. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 2, pp. 66–78. DOI: 10.18799/24131830/2025/2/4632

Введение

Каждый житель Земли должен понимать, что он, являясь потребителем и производителем, несет ответственность за модель своего поведения по отношению к образующимся отходам в процессе его жизнедеятельности. В статье 1 Федерального закона от 24.06.1998 г. № 89-ФЗ «Об отходах производства и потребления» отходы производства и потребления определяются следующим образом: вещества или предметы, которые образованы в процессе производства, выполнения работ, оказания услуг или в процессе потребления, которые удаляются, предназначены для удаления или подлежат удалению в соответствии с настоящим Федеральным законом». Таким образом, отходы являются элементом процесса жизнедеятельности, который невозможно рассматривать отдельно от других процессов.

По данным Росстата [1], в 2021 г. российская экономика произвела 8,5 млрд т отходов, преимущественно промышленных, которые отличаются от бытового мусора. Обычно мусором называют твердые бытовые отходы (ТБО) и твердые коммунальные отходы (ТКО), которые составляют около 50 млн т в год в России [2]. Объемы бытового мусора постоянно увеличиваются, примерно удвоившись за последние два десятилетия благодаря широкому использованию упаковочных материалов, таких как полиэтилен, пластик и бумага.

Среднестатистический житель России создает примерно 2 кубометра мусора в год, что составляет около 400 кг, или 1,1 кг в сутки. Более одной четверти от общего объема мусора приходится на пищевые отходы, бумага и картон составляют почти 20 %, а стекло – 17 % [3]. В разных странах эти соотношения значительно различаются: в Китае и Бразилии большая часть мусора состоит из пищевых отходов, в США – из бумаги, а в Великобритании – из пластика.

Во всем мире количество отходов, образующихся на человека в день, составляет в среднем 0,74 килограмма, но колеблется в широких пределах – от 0,11 до 4,54 килограмма [3]. Ежегодно образуется не менее 21 % коммунальных отходов

(т. е. отходов из жилых, коммерческих и институциональных источников), которые не утилизируются экологически безопасным способом. Если нынешние темпы производства товаров и образования отходов сохранятся, то к 2050 г. общий объем ежегодных нерационально обращенных отходов во всем мире увеличится более чем в два раза.

Из анализа приведенных выше данных становится очевидным, что производство мусора коррелирует с уровнем национального дохода. Иначе говоря, в богатых странах в пересчете на душу населения его вырабатывается больше. В последние десятилетия международное сообщество сосредоточило свое внимание на вопросах устойчивого развития и преодоления экологических проблем, связанных с контролем над отходами. Таким образом, управление твердыми отходами является глобальной проблемой, которая затрагивает каждого человека и правительства разных стран в целом.

В актуальности данной проблемы можно убедиться самостоятельно, взглянув на огромное количество специальных баков для раздельного сбора отходов в городской инфраструктуре. Тем не менее данный метод решения имеет свои несовершенства. У ручного способа сортировки отходов существует такой недостаток, как человеческий фактор, который часто игнорируется в первичном разделении отходов в городской среде [4]. Большинство людей не задумываются над тем, в какой контейнер выбросить мусор, из-за чего отходы часто оказываются выброшенными «куда попало». Кроме того, гражданам, которые хотят правильно сортировать мусор, приходится тратить время на то, чтобы разобраться в данной системе. Для повышения эффективности сортировки и решения возникшей проблемы предлагается автоматизация всего цикла сортировки и переработки мусора.

Литературный анализ

Для получения данных об автоматической сортировке мусора был осуществлен систематический поиск рецензируемой литературы в базе данных Web of Science (WoS), которая является ведущей в мире базой данных цитирования и включает в себя

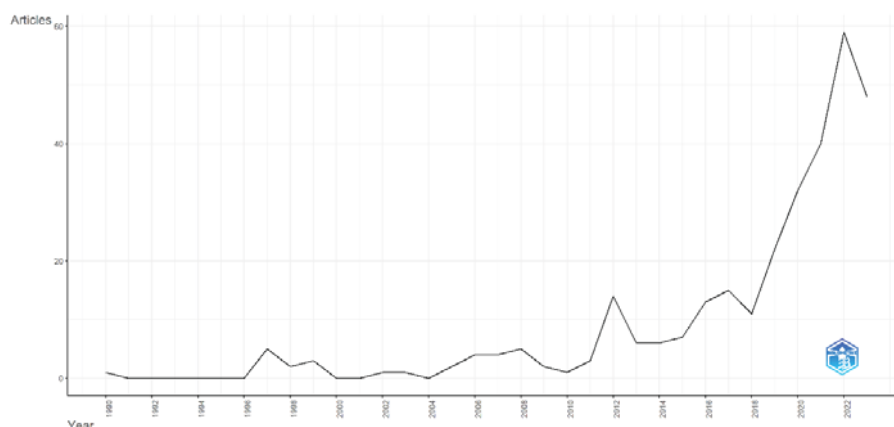
множество авторитетных международных академических журналов по различной тематике. Темой поиска была (automatic) AND ("sorting" OR "classification") AND ("garbage" OR "waste"). Язык поиска был ограничен английским, и в него были включены рецензируемые научные статьи и обзорные журналы, опубликованные до января 2024 г. В результате было получено в общей сложности 307 публикаций.

Были использованы два метода анализа библиографической информации отобранных публикаций: библиометрический анализ и визуализация различных категорий. В рамках библиометрического анализа применялись оценка эффективности и научное картирование. Имеется много показателей для оценки продуктивности исследовательских элементов. В настоящей работе графическое представление результатов анализа ежегодной научной продукции, среднего количества цитирований в год, сотрудничества между странами и прочего были получены с помощью пакета biblioshiny в среде разработки RStudio. Сетевой анализ совпадения

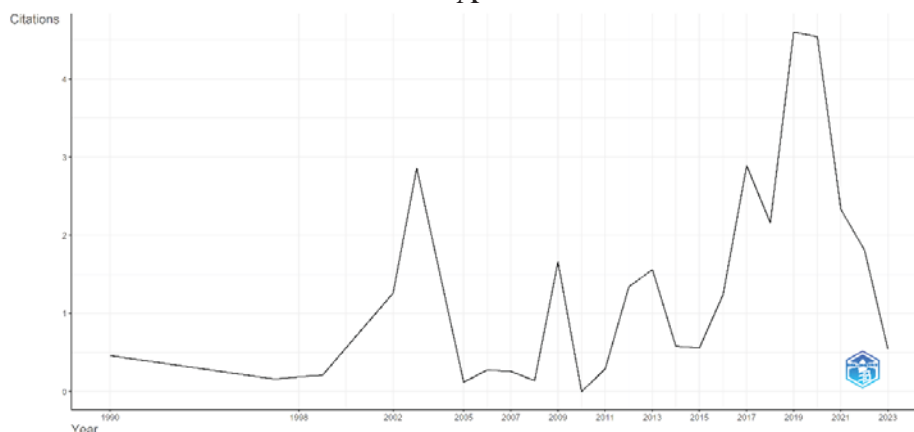
ключевых слов был выполнен при использовании программного инструмента VOSviewer.

Ежегодные тенденции в публикациях

В результате поиска было найдено 307 статей об автоматической сортировке мусора. В период с 1990 по 1996 гг. данная тема не была актуальной в связи с ограниченностью ресурсов того времени и сложностью реализации подобного процесса с технической точки зрения. В 1997 г. было опубликовано 5 статей, одна из которых была посвящена оценке вихревой технологии в качестве метода для отделения цветных металлов от смешанных потоков отходов и от предварительно отделенного упаковочного материала. С 1998 по 2011 гг. в свет было выпущено 33 публикации. В 2012 г. было зафиксировано резкое увеличение числа публикаций по данной теме: было создано 14 трудов, что заметно отличается от статистики за предыдущие годы (рис. 1, А). К сожалению, статьи не сохранили прежних темпов роста и последующие два года демонстрировали снижение. Однако начиная с 2015 г. и по сегодняшний день прослеживается стабильная тенденция повышения заинтересованности к автоматизации процесса сортировки мусора: в 2015 г. было опубликовано 7 статей, в 2022 – 59.



А



Б

Рис. 1. Ежегодная научная продукция (А); среднее количество цитирований в год (Б)
Fig. 1. Annual scientific output (А); average number of citations per year (Б)

Среднее количество цитирований в год показывает флуктуацию по годам с максимальным значением в 2022 г., в то время как первый пик пришелся на 2003 г. (рис. 1, Б). Тенденция также свидетельствует об увеличении интереса к автоматической сортировке мусора как к способу решения проблемы утилизации мусора.

Географические тенденции в исследованиях

В географическом контексте ученые из Китая, Германии, Индии, Италии и Испании занимают лидирующую роль и продолжают осуществлять исследования по разработке автоматизированного процесса сортировки мусора и последующей его утилизации (рис. 2, А). За последние три десятилетия больше всего работ было опубликовано в Китае (256 статей),

затем в Германии (45 статей) и Индии (37 статей), в то время как в других странах эта тема изучалась реже. По данному показателю Россия находится на 14-м месте, поскольку было создано всего 12 трудов.

Совместные исследования между странами были весьма ограниченными (рис. 2, Б). Анализ сетевых связей продемонстрировал, что Китай, Испания, США, Великобритания и Германия показали высокий уровень кооперации в работе. Данные страны являются лидерами в области научных исследований и инноваций, что обеспечивает плодотворное сотрудничество в разработке современных и наиболее эффективных способов решения экологических проблем, а также в совершенствовании уже существующих решений.

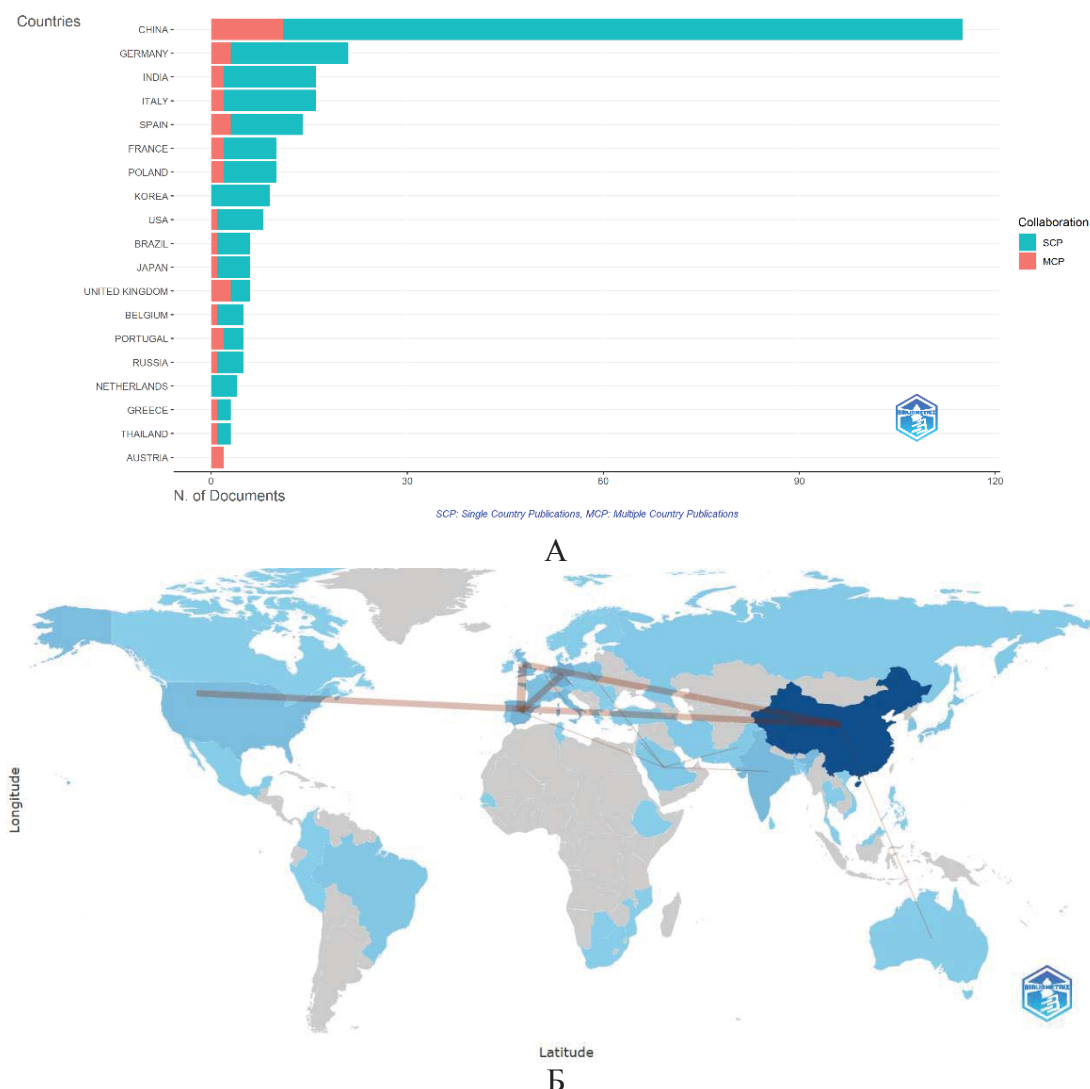
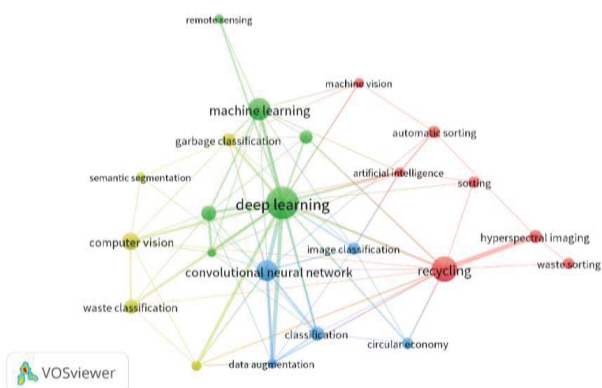


Рис. 2. Наиболее продуктивные страны по количеству публикаций, выпущенных самостоятельно (SCP) или в сотрудничестве (MCP) (А); сеть сотрудничества между странами (линии показывают сотрудничество, толщина указывает на количество статей) (Б)

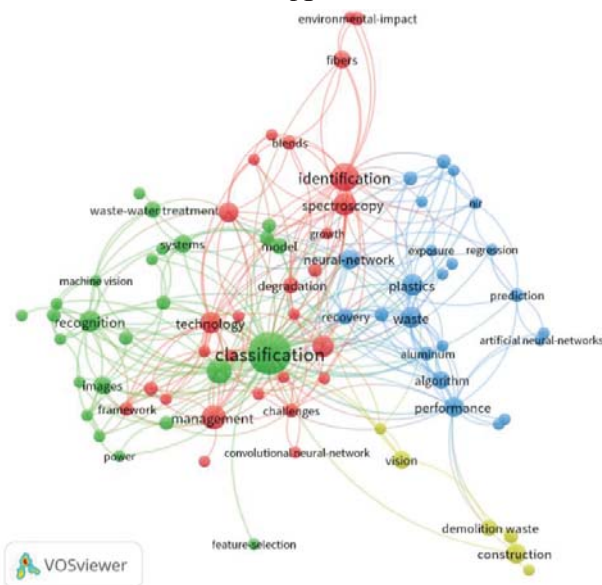
Fig. 2. The most productive countries in terms of the number of publications produced independently (SCP) or in collaboration (MCP) (A); network of cooperation between countries (lines show cooperation, thickness indicates the number of articles) (B)

Совпадение ключевых слов и тематическая карта в исследованиях

Сетевой анализ и составление тематической карты на основе ключевых слов (ключевые слова авторов и ключевые слова plus) играют важную роль в понимании изменений и возникающих тем в исследованиях. Для определения тематической структуры поля был проведен анализ совпадений ключевых слов авторов (рис. 3, А). Всего было выявлено четыре кластера, связанных с автоматической сортировкой мусора. Красный кластер является основным и содержит семь ключевых слов, обозначающих основную цель исследования, таких как «переработка», «сортировка» и «автоматическая сортировка».



А



Б

Рис. 3. Совпадение ключевых слов авторов (А); совпадение ключевых слов plus (Б)

Fig. 3. Matching of the authors keywords (A); matching of the plus keywords (B)

Зеленый сектор состоит из шести терминов, связанных с глубоким машинным обучением, синий –

из пяти терминов, посвященных сверточной нейронной сети, желтый – из пяти терминов о компьютерном зрении. Наибольшая частота встречаемости приходится на термин «глубокое обучение», так как автоматическая сортировка мусора тесно связана с концепцией глубокого обучения. Это подвид машинного обучения, основанный на искусственных нейронных сетях, которые состоят из множества слоев, что позволяет им обрабатывать и анализировать сложные данные. Таким образом, глубокое обучение позволяет создавать более точные модели, позволяя системам адаптироваться к различным типам мусора и условиям работы.

Сетевой анализ с использованием ключевых слов plus выявил четыре кластера (рис. 3, Б). Основной красный (28 терминов) и зеленый (25 терминов) кластеры отражают направленность исследований на модели автоматической классификации мусора. Синий (23 термина) и желтый (6 терминов) кластеры связаны с управлением отходами в целом: «отходы», «пластик», «алюминий». Среди других часто встречающихся терминов были «классификация», «идентификация» и «спектроскопия».

Для выявления тематической структуры ключевых слов был построен двумерный график (рис. 4). Исследовательские темы, находящиеся в правом верхнем углу и характеризующиеся высокими внутренними и внешними ассоциациями, считаются основными в литературе. Таким образом, можно выделить три ключевых направления в исследованиях по данной теме.

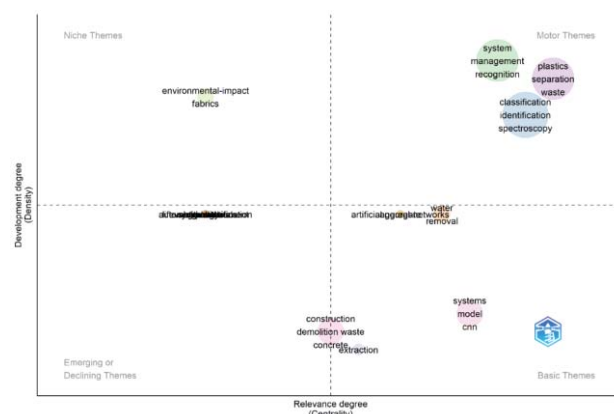


Рис. 4. Концептуальная тематическая карта

Fig. 4. Conceptual thematic map

Первое направление сопровождается ключевыми словами «система», «управление», «распознавание». Второе направление – «отходы», «пластик», «разделение». Третье направление – «классификация», «идентификация» и «спектроскопия». Напротив, темы исследований в левом нижнем квадранте, с низкими значениями плотности и центральности,

являются слабо разработанными или формирующимися темами, требующими дальнейшего развития. В этот кластер вошла тема «воздействие на окружающую среду».

Вывод

Исходя из литературного анализа публикаций в базе данных Web of Science, становится очевидно, что тема автоматической сортировки и утилизации мусора является крайне актуальной. С каждым годом все больше исследований посвящается этой теме, и это неудивительно, ведь проблема мусора – одна из самых острых проблем современного мира, которая требует немедленного решения.

В настоящее время существует множество исследований, направленных на разработку новых методов автоматической сортировки мусора, начиная от использования роботов до применения инновационных технологий. Некоторые из них уже успешно применяются на практике, но еще много предстоит сделать.

Обзор существующих методов

Существуют автоматические системы для разделения твердых бытовых отходов, в которых обычно применяются два метода сортировки [5]: (1) прямая сортировка, которая использует свойства материалов для разделения, такие как магнитная восприимчивость, электропроводность или плотность материала, и (2) косвенная сортировка, которая использует датчики для обнаружения и классификации объектов по категориям вторичной переработки.

Процесс разделения может быть выполнен в двух местах:

1. В месте образования отходов, где пользователь непосредственно утилизирует свои отходы. Процесс зондирования обычно проводится в камере, и собранная информация обрабатывается для отправки сигналов двигателям или исполнительным механизмам, направляющим отходы в соответствующий контейнер [6].
2. В централизованном месте, где выполняются последовательные процессы считывания по мере транспортировки отходов по конвейерной ленте. Для сбора информации об отходах используются различные технологии, такие как индуктивные датчики, датчики цветовой идентификации или датчики на основе изображений. Эти данные обрабатываются для идентификации отходов и помещения их в соответствующий контейнер [7].

Многие исследователи применяли методы глубокого обучения в области управления отходами. В частности, P. Nowakowski и др. [8] использовали сверточные нейронные сети CNN и R-CNN с целью обнаружения и классификации электронного мусо-

ра, чтобы помочь компаниям, специализирующимся на сборе отходов. Группа ученых под руководством Q. Zhang [9] использовала трансферное обучение на основе DenseNet для классификации и набора данных TrashNet на макулатуру, пластик, ткань, металл и стекло с точностью, достигающей 83 %. Ning Kai и др. [10] использовали YOLO v2 как базовый сетевой модуль и интегрировали с ним модули глубокой плотности, разработав интеллектуального робота-подметальщика, способного разделять мусор на 25 подкатегорий, включая туалетную бумагу, банку, молоко и т. д., на основе формы и объема. Chen Yuchao и др. [11] предложили использовать OpenCV для реализации алгоритма разности фона: вырезать объект, который необходимо обнаружить, из изображения, а затем использовать MobileNet для разделения изображения на шприцы, кровоостанавливающие щипцы, пакеты для инфузий и перчатки.

Классификация бутылок, однако, представляет собой сложную задачу, поскольку бутылки могут иметь различные размеры, цвета, форму и степень деформации. Отраженный от поверхности бутылок свет может создавать сложности при выделении характерных признаков. Исследователи используют для классификации бутылок как методы машинного обучения, так и глубокого обучения. Y. Tachwali и др. [12] использовали химический состав и цвет для классификации пластиковых бутылок.

В работе [13] использовали Arduino UNO R3 в качестве основной платы управления и модуль распознавания цвета для реализации функции классификации. Такой метод (основанный на анализе цвета) обладает ограниченными возможностями распознавания, позволяя сортировать лишь относительно простые объекты. Автоматическая сортировка сложного мусора в этом случае затруднена. Однако можно комбинировать различные методы для повышения эффективности их работы.

В этой работе предлагается надежное решение собственного производства, простое в воспроизведении, с открытым исходным кодом. Благодаря собственной разработке система будет поддерживаться с минимальными затратами по сравнению с иностранными аналогами, обслуживание которых может быть дорогостоящим.

Предлагаемое решение

Основной идеей решения является распознавание материала отходов и реализация распределения мусора по соответствующим контейнерам на основе Arduino [14]. Преимущества использования датчиков Arduino для автоматической сортировки перед роботами заключается в следующем:

- гибкость и масштабируемость: Arduino способствует созданию кастомных датчиков и обеспечивает их адаптивное поведение под конкретные потребности сортировки мусора, что позволяет легко добавлять новые типы мусора для сортировки или изменять параметры существующих датчиков [15];
- простота использования: Arduino имеет простой и интуитивно понятный интерфейс, тем самым предоставляя для широкого круга пользователей возможность легко программировать и настраивать датчики для определения и сортировки различных типов мусора [16];
- низкая стоимость: Arduino является относительно недорогим и доступным решением для создания систем автоматической сортировки мусора, что существенно снижает затраты на разработку и внедрение таких систем;
- возможность интеграции: Arduino может быть легко интегрирован с другими компонентами системы сортировки мусора, такими как конвейеры, роботы-манипуляторы и контрольные системы, позволяя создавать полноценные автоматические системы сортировки мусора, ко-

которые могут работать вместе с другими компонентами производственного процесса [17].

Таким образом, вышеперечисленные преимущества делают Arduino привлекательным выбором для разработки и внедрения автоматизированных систем сортировки мусора.

Работа системы

Процесс автоматической сортировки начинается с момента, когда мусор попадает в специальный бак и вызывает срабатывание кнопки. После этого запускается этап распознавания при помощи датчиков Arduino. Датчики собирают информацию о типе мусора и передают ее на микроконтроллер Arduino [18].

После идентификации мусора платформа, на которой установлены контейнеры для разных видов мусора, поворачивается на определенное количество градусов, в зависимости от типа мусора, и подставляет соответствующий контейнер для сброса мусора. Затем платформа возвращается в исходное положение, ожидая следующего цикла сортировки.

Алгоритм работы системы представлен на рис. 5.

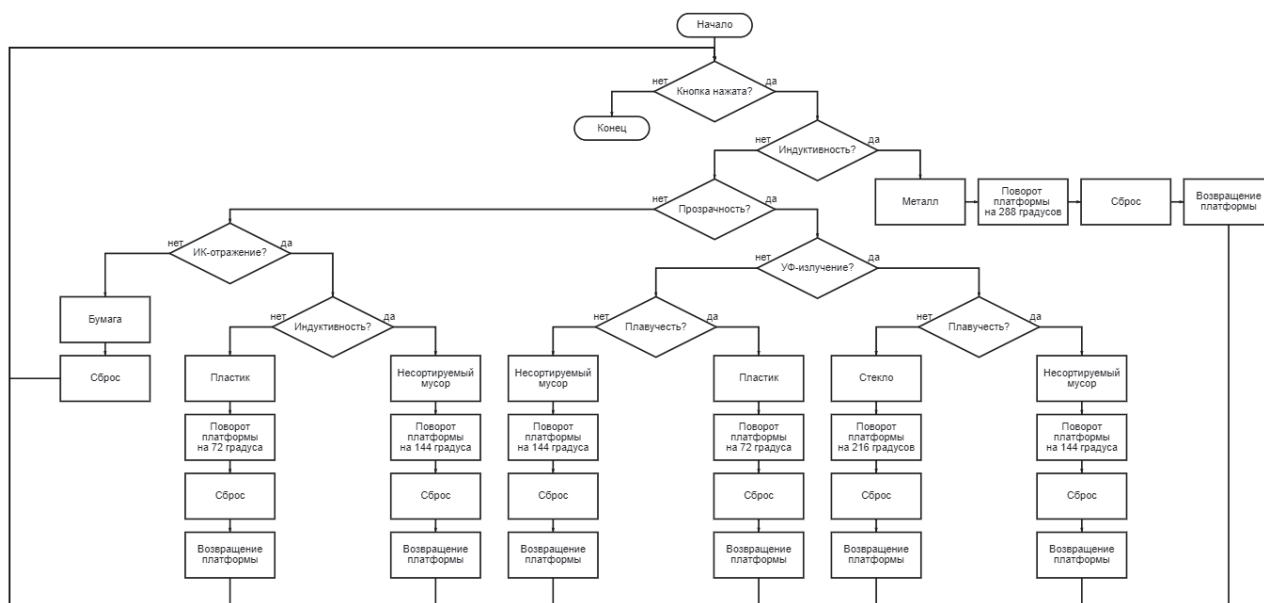


Рис. 5. Блок-схема работы автоматической системы

Fig. 5. Block diagram of the automatic system operation

Аппаратная реализация

Для создания системы автоматической сортировки мусора на основе Arduino было выбрано оборудование, представленное в таблице. Система датчиков была разработана на основе анализа

свойств различных материалов, таких как бумага, стекло, пластик и металл [19].

Принципиальная схема подключения датчиков представлена на рис. 6.

Таблица. Необходимое оборудование и его характеристики

Table. Required equipment and its characteristics

Оборудование Equipment	Изображение/Image	Принцип работы Operation principle	Назначение в системе Appointment in the system
Arduino UNO		Плата микроконтроллера, которая предназначена для разработки и прототипирования различных электронных устройств Microcontroller board, which is designed for the development and prototyping of various electronic devices	Подключение датчиков Connecting sensors
Индуктивный датчик PS2 Inductive sensor PS2		Принцип действия основан на изменении параметров магнитного поля катушки индуктивности, в зону которой попадает металлический объект Operation principle is based on changing the parameters of the magnetic field of the inductor, into the zone of which a metal object falls	Обнаружение металла среди мусора Metal detection among waste
Mini Photocell LDR		Фоторезистор, изменяющий свое сопротивление в зависимости от интенсивности попадающего на него света Photoresistor that changes its resistance depending on the intensity of the light hitting it	Оценка прозрачности мусора Waste transparency assessment
Датчик препятствия KY-032 Obstacle sensor KY-032		Устройство имеет передатчик (IR LED), излучающий инфракрасный луч частотой 38 кГц, который принимается приемником (IR receiver) на плате Device has a transmitter (IR LED) emitting an infrared beam with a frequency of 38 kHz, which is received by a receiver (IR receiver) on the board	Отличие пластика от бумаги Difference between plastic and paper
IR Receiver Diode TSOP38238		Инфракрасный приемник содержит специальную микросхему, которая демодулирует входящий сигнал и декодирует принимаемые данные с помощью встроенного PIN диода, предварительного усилителя и полосового фильтра/Infrared receiver contains a special chip that demodulates the incoming signal and decodes the received data using a built-in PIN diode, a preamp and a bandpass filter	
UV Sensor Breakout ML8511		УФ-датчик оснащен внутренним усилителем, который преобразует фототок в напряжение в зависимости от интенсивности УФ-излучения UV sensor is equipped with an internal amplifier that converts the photocurrent into voltage depending on the intensity of UV radiation	Отличие пластика от стекла Difference between plastic and glass
Water Level Sensor Module		На печатной плате датчика расположены длинные проводящие пластины и при достижении водой определенного уровня проводимость между двумя пластинами изменяется/There are long conductive plates on the sensor circuit board and when water reaches a certain level, the conductivity between the two plates changes	Оценка плавучести мусора Waste buoyancy assessment
Модуль тактовой кнопки KY-004 Clock button module KY-004		Модуль имеет нормально разомкнутые контакты, то есть контакты замыкаются при нажатии на кнопку, а на выходе датчика появляется напряжение низкого уровня Module has normally open contacts, that is, the contacts close when the button is pressed and a low level voltage appears at the sensor output	Запуск сортировки Start sorting
9G Micro Servo		Сервомотор имеет встроенный потенциометр, подключенный к выходному валу. Поворачивая вал, серво изменяет напряжение на потенциометре. Плата анализирует напряжение входного сигнала и сравнивает его с напряжением потенциометра Servo motor has a built-in potentiometer connected to the output shaft. By turning the shaft, the servo changes the voltage on the potentiometer. The board analyzes the voltage of the input signal and compares it with the voltage of the potentiometer	Сброс мусора в соответствующий контейнер Dumping waste into the appropriate container
Small Reduction Stepper Motor with Easy Driver 5VDC 32-Step 1/16 Gearing		Однополярный двигатель имеет встроенную монтажную пластину с двумя монтажными отверстиями. На оборот приходится всего 32 шага (11,25 градуса), а внутри находится 1/16 набор редукторов Unipolar motor has an integrated mounting plate with two mounting holes. There are only 32 steps per revolution (11.25 degrees), and inside there is a 1/16 set of gearboxes	Поворот контейнеров Rotating containers

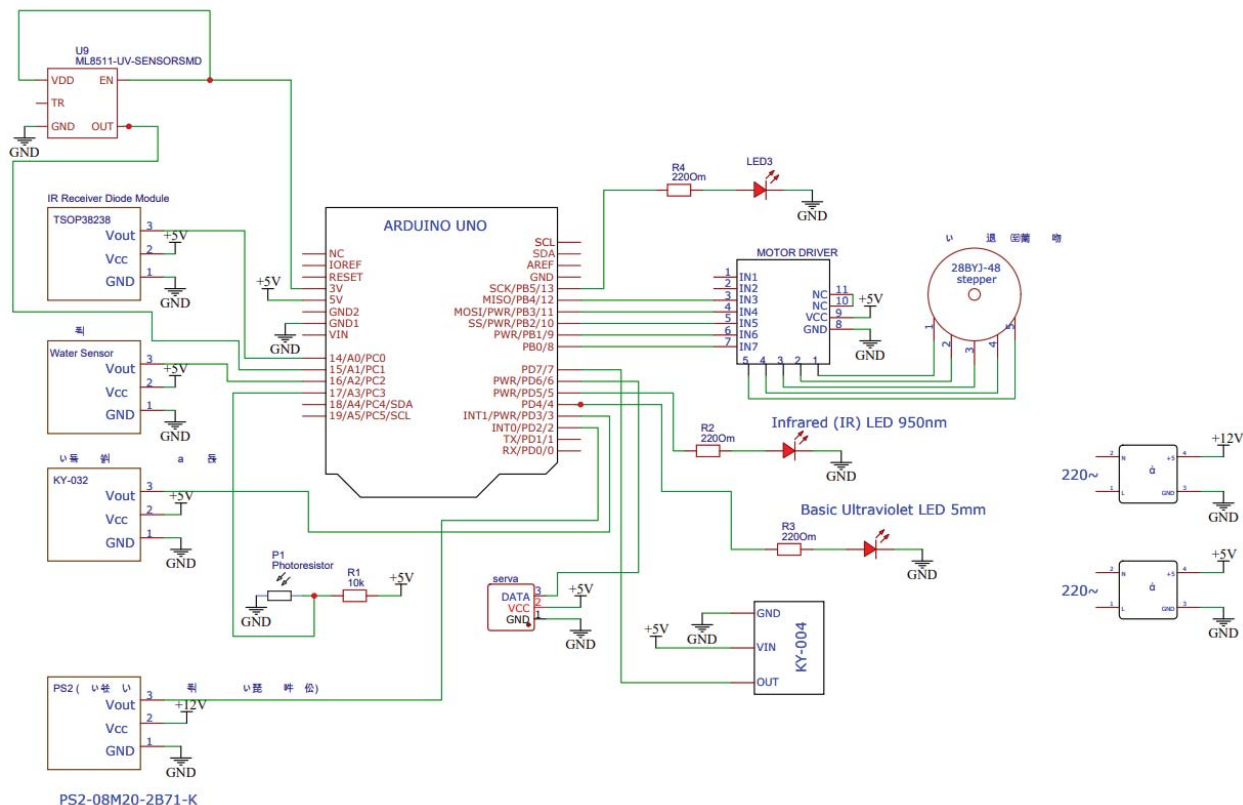


Рис. 6. Принципиальная схема подключения датчиков
Fig. 6. Schematic diagram of sensor connection

Таким образом, автоматическая система сортировки мусора представляет собой устройство, состоящее из нескольких основных компонентов:

1. Бак с контейнерами. Бак является основным компонентом системы. Он состоит из нескольких контейнеров, каждый из которых предназначен для определенного вида мусора. В один контейнер сбрасывается пластик, во второй – бумага, в третий – стекло и так далее.
2. Кнопка запуска сортировки. Кнопка позволяет запустить процесс сортировки мусора. Когда упавший в бак мусор зажимает кнопку, система начинает сортировать мусор по соответствующим отделениям.
3. Датчики. Система оснащена датчиками, которые определяют тип мусора и отправляют информацию на контроллер.
4. Контроллер. Контроллер получает информацию от датчиков и управляет работой системы. Он также обрабатывает данные о том, сколько мусора находится в каждом отделении и когда нужно заменить контейнер.
5. Двигатель. Двигатель используется для поворота контейнеров, чтобы переместить в него соответствующий мусор, по сигналу контроллера.

Примерная 3D-модель автоматической системы сортировки мусора представлена на рис. 7.

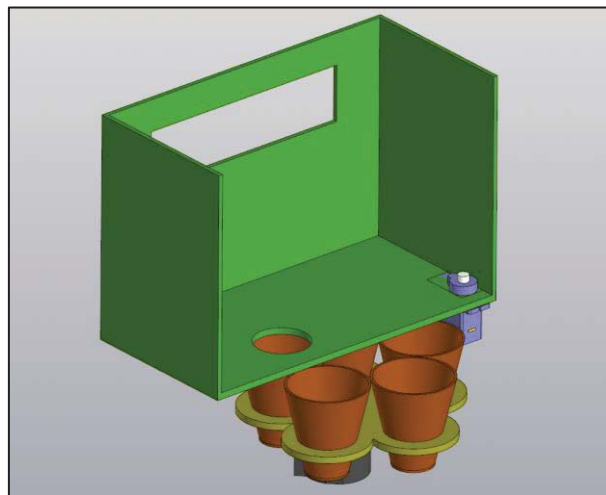


Рис. 7. 3D-модель автоматической системы сортировки мусора
Fig. 7. 3D model of automatic waste sorting system

В качестве практического аспекта была создана упрощенная система автоматической сортировки мусора на основе имеющегося оборудования (рис. 8). Механизм системы работал исправно: распознав с помощью датчиков тип мусора, Arduino активировала мотор, который перемещал мусор в соответствующий контейнер.

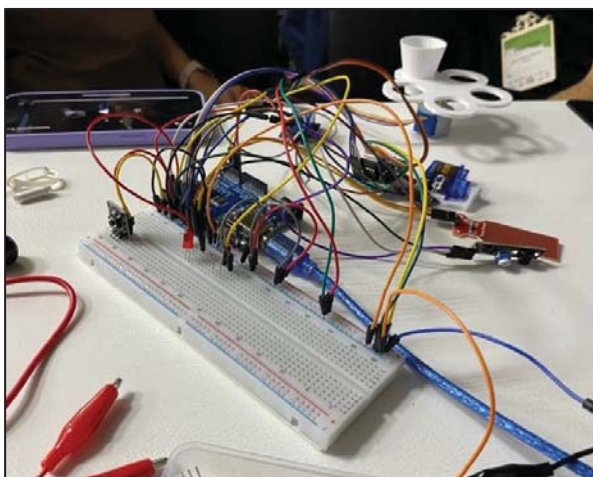


Рис. 8. Процесс сборки автоматической системы сортировки мусора

Fig. 8. Assembly process of the automatic waste sorting system

Результаты и обсуждение

При подготовке этой статьи было создано два прототипа системы сортировки мусора. Первый прототип был оснащен меньшим количеством датчиков, что снижало его способность точно различать типы мусора. Кроме того, этот прототип был оборудован датчиком дыма, который требовал нагревания мусора, что является небезопасным и экологически отрицательным процессом [20].

Однако после внесения значительных улучшений была развернута работа над вторым прототипом – именно он является предметом обсуждения в данной статье. Этот прототип более точно сортирует мусор, отличается надежностью электронной обработки и может эффективно функционировать в любых погодных условиях благодаря тщательно продуманному корпусу.

Результаты обнаружения мусора

В режиме реального времени была проведена проверка механизма автоматической сортировки мусора. Это проверка состояла из 200 повторений строгого тестирования с различным типом мусора.

Первоначально система сортировки мусора была полностью функционально протестирована 100 раз. В процессе тестирования были выявлены ошибки модели в сортировке отходов: в 29 случаях модель неправильно сортировала мусор. Ошибки включали в себя: неспособность обнаружить бумажные отходы (3 раза), ошибочное определение стеклянных отходов как пластиковых (17 раз) и неверная идентификация стекла как несортируемого мусора (9 раз). Это было связано с недостаточной разработкой системы датчиков и пропуском возможных сценариев развития событий. Для исправления этой существенной проблемы тот же

набор данных был протестирован повторно, на этот раз с использованием более широкой системы датчиков, которая позволила просчитать больше вариантов и улучшить точность сортировки мусора. Это изменение снизило количество неправильных сортировок с 29 до 13. Из этих 13 ошибок: в 2 случаях были ошибочно классифицированы бумажные отходы, в 7 случаях стеклянные отходы были определены как пластиковые, в 4 случаях стекло было определено как несортируемые отходы. Этот процесс тестирования продемонстрировал необходимость дальнейшего усовершенствования системы сортировки мусора.

Дальнейшее усовершенствование системы

В будущем планируется улучшение и оптимизация системы:

1. Установка информационного дисплея позволит предоставить пользователям дополнительную информацию о процессе сортировки и правильном размещении отходов.
2. Использование SMS для передачи данных позволит в режиме реального времени отслеживать заполненность контейнеров и состояние системы. Благодаря возможности получать уведомления о заполненных контейнерах и оперативно отправлять команды на их опустошение можно предотвратить переполнение контейнеров и повысить эффективность работы системы.
3. Расширение ассортимента датчиков для распознавания поможет повысить точность и надежность системы сортировки мусора. Добавление датчиков для определения новых видов отходов или улучшение уже существующих для более точной идентификации типа мусора позволит избежать ошибок в сортировке и повысить эффективность утилизации.

Заключение

Данное исследование обращает внимание на остроту вопроса загрязнения окружающей среды отходами и подчеркивает необходимость их сортировки для успешной переработки и утилизации. Автоматизированная система идентификации типа мусора на базе Arduino демонстрирует сравнительно высокую степень точности и способна внести свой вклад в решение этой проблемы. Углубленное изучение и совершенствование подобных технологий в состоянии значительно упростить процедуру сортировки мусора и обеспечить более эффективное его использование с точки зрения сбережения ресурсов и охраны окружающей среды.

В работе на основании литературных источников были проанализированы различные методы распознавания мусора, суть которых сводится к двум подходам. Первый, который можно назвать традиционным, основан на анализе физических

свойств объекта (цвет, прозрачность, твердость, магнитная и диэлектрическая проницаемость и т. п.). Второй, более современный, основан на анализе изображения (внешний вид) мусора в различных диапазонах (видимый, инфракрасной, ультрафиолетовый) и использовании машинного зрения с обучением на основе нейросетей или подобных технологий. Первый метод более дешёвый, второй более эффективный, но требует более дорогих аппаратных и программных решений. Преимуществом второго метода является его универсальность, однако учитывая однообразность бытового мусора по его предметному составу, повышенные аппаратные требования, а также сложности с эксплуатацией (такая электроника любит чистоту и

комфортную температуру), этот метод уже не кажется столь оптимальным.

Проведенный анализ показывает, что и традиционный метод можно использовать достаточно эффективно. Экспериментальные исследования авторов, приведенные в статье, подтверждают, что используемый ими простой алгоритм пошагового анализа физических свойств мусора дает достаточную для практического использования точность сортировки. Вопрос в эффективном сочетании анализируемых физических свойств объекта и порядка их проверки. А аппаратная платформа Arduino и простые датчики физических величин не требуют особых условий в эксплуатации и имеют минимальную стоимость.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Отходы производства и потребления: Федеральная служба государственной статистики. URL: <https://rosstat.gov.ru/folder/11194#> (дата обращения: 01.03.2024).
2. Мусина С.А., Науширванова Э.Р., Яковлева А.А. Повышение экологической безопасности мясоконсервного комбината путем утилизации отходов животного происхождения // Проблемы обеспечения безопасности (Безопасность-21): материалы III Международной научно-практической конференции. – Уфа: Уфимский государственный авиационный технический университет, 2021. – Т. 2. – С. 119–123.
3. What a waste 2.0: a global snapshot of solid waste management to 2050 / S. Kaza, L. Yao, P. Bhada-Tata, F. van Woerden // Urban Development, World Bank Publications. – Washington, DC, USA, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1596/978-1-4648-1329-0>.
4. Костин С.В., Шамраев А.А., Якимайнен Д.С. Автоматическая классификация и сортировка бытовых отходов // Современные наукоемкие технологии. – 2022. – № 5-2. – С. 204–208.
5. Сальникова М.Е., Зелинская Е.В. Методы сортировки твердых коммунальных отходов // Инновационные научные исследования. – 2022. – № 4-2 (18). – С. 5–15.
6. Computer vision based two-stage waste recognition-retrieval algorithm for waste classification / S. Zhang, Y. Chen, Z. Yang, H. Gong // Resources, Conservation and Recycling. – 2021. – Vol. 169. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105543>.
7. Гажур А.А., Белозеров И.А. Умный контейнер для автоматической сортировки мусора // Современные инновационные технологии в экономике, науке, образовании: материалы V Международной научно-практической конференции. – М.: Российский экономический университет имени Г.В. Плеханова, 2022. – С. 198–209.
8. Nowakowski P., Pamula T. Application of deep learning object classifier to improve e-waste collection planning // Waste Management. – 2020. – Vol. 109. – P. 1–9.
9. Waste image classification based on transfer learning and convolutional neural network / Q. Zhang, Q. Yang, X. Zhang, Q. Bao, J. Su, X. Liu // Waste Management. – 2021. – Vol. 135. – P. 150–157.
10. Kai N., Dongbo Z., Feng Y. Rubbish detection and classification of intelligent sweeping robot based on visual perception // Journal of Image and Graphics. – 2019. – Vol. 24 (8). – P. 1358–1368.
11. Yuchao C., Xiaoxiao B. Medical garbage classification system based on machine vision and deep learning // Computer Programming Skills and Maintenance. – 2019. – Vol. 5. – P. 108–110.
12. Tachwali Y., Al-Assaf Y., Al-Ali A. Automatic multistage classification system for plastic bottles recycling // Resources, Conservation and Recycling. – 2007. – Vol. 52. – P. 266–285.
13. Xiang Z., Peng X., Huanping G. Intelligent sorting trash can based on Arduino // Electronic World. – 2020. – Vol. 4. – P. 160–161.
14. Макаров А.А., Солодков Б.Е. Разработка программного обеспечения для программируемой платформы Arduino на базе микроконтроллера ATMEGA 328P // Дизайн и технологии. – 2014. – № 44 (86). – С. 88–91.
15. Меньшиков С.В., Ващук Е.С. Осуществление программирования на платформе Arduino: способы и возможности использования платы Arduino UNO // Современные вопросы естествознания и экономики: сборник трудов IV Международной научно-практической конференции. – Прокопьевск: Филиал Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева», 2022. – С. 256–262.
16. Унайбаев Б.Ж., Пак В.Г., Зозуля Е.С. Краткий обзор и перспективы применения микропроцессорной платформы Arduino в учебном процессе // Механика и технологии. – 2019. – № 4 (66). – С. 193–198.
17. Быкова А.В. Передача динамических показателей с цифровых датчиков через контроллер Arduino NANO на контроллер Arduino UNO // Инновационные научные исследования. – 2021. – № 6-3 (8). – С. 264–269.
18. Астафьев В.Ю. Возможности платы Arduino для получения информации из окружающей среды // Современные проблемы геометрического моделирования и информационные технологии: материалы I Межрегиональной научно-практической конференции преподавателей и студентов. – Мелитополь: Государственное образовательное учреждение высшего образования «Мелитопольский государственный университет», 2023. – С. 121–129.
19. Лукашик Е.Я. Использование платформы Arduino для изучения принципа работы параметрических датчиков // Сборник материалов Республиканской научно-практической конференции с международным участием, посвященной 85-летию со

дня рождения профессора Борисюка Михаила Владимировича – Гродно: Гродненский государственный медицинский университет, 2022. – С. 160–161.

20. Багутдинов Р.А. Проектирование модульной мультисенсорной системы для задач мониторинга окружающей среды на базе Arduino // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Экономика. Информатика. – 2019. – Т. 46. – № 1. – С. 173–180.

Информация об авторах

Лия Науфальевна Хасанова, бакалавр, кафедра безопасности производства и промышленной экологии, Институт химии и защиты в чрезвычайных ситуациях, Уфимский университет науки и технологий, Россия, 450076, г. Уфа, ул. Заки Валиди, 32, liyahasanovaa@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0006-3276-8630>

Полина Николаевна Скуратова, бакалавр, кафедра безопасности производства и промышленной экологии, Институт химии и защиты в чрезвычайных ситуациях, Уфимский университет науки и технологий, Россия, 450076, г. Уфа, ул. Заки Валиди, 32, polina-skuratova@list.ru, <https://orcid.org/0009-0003-2318-130X>

Светлана Айратовна Мусина, старший преподаватель, кафедра безопасности производства и промышленной экологии, Институт химии и защиты в чрезвычайных ситуациях, Уфимский университет науки и технологий, Россия, 450076, г. Уфа, ул. Заки Валиди, 32, musina.sa@ugatu.su, <https://orcid.org/0009-0000-1117-1049>

Поступила в редакцию: 26.03.2024

Поступила после рецензирования: 25.10.2024

Принята к публикации: 24.12.2024

REFERENCES

1. *Production and consumption waste: Federal State Statistics Service*. (In Russ.) Available at: <https://rosstat.gov.ru/folder/11194#> (accessed 1 March 2024).
2. Musina S.A., Naushirvanova E.R., Yakovleva A.A. Improving the environmental safety of the meat canning plant by recycling animal waste. *Problems of safety (Safety-21): materials of the III International Scientific and Practical Conference*. Ufa, Ufa State Aviation Technical University Publ., 2021. Vol. 2, pp. 119–123. (In Russ.)
3. Kaza S., Yao L., Bhada-Tata P., Van Woerden F. What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050. *Urban Development, World Bank Publications*. Washington, DC, USA, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1596/978-1-4648-1329-0>
4. Kostin S.V., Shamraev A.A., Yakimajnen D.S. Automatic classification and sorting of household waste. *Modern high-tech technologies*, 2022, no. 5-2, pp. 204–208. (In Russ.)
5. Salnikova M.E., Zelinskaya E.V. Methods of sorting municipal solid waste. *Innovative scientific research*, 2022, no. 4-2 (18), pp. 5–15. (In Russ.)
6. Zhang S., Chen Y., Yang Z., Gong H. Computer vision based two-stage waste recognition-retrieval algorithm for waste classification. *Resources, Conservation and Recycling*, 2021, vol. 169. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105543>.
7. Gazhur A.A., Belozero I.A. Smart container for automatic garbage sorting. *Modern innovative technologies in economics, science, and education. Proc. of the V International Scientific and Practical Conference*. Moscow, Plekhanov Russian University of Economics Publ., 2022. pp. 198–209. (In Russ.)
8. Nowakowski P., Pamula T. Application of deep learning object classifier to improve e-waste collection planning. *Waste Management*, 2020, vol. 109, pp. 1–9.
9. Zhang Q., Yang Q., Zhang X., Bao Q., Su J., Liu X. Waste image classification based on transfer learning and convolutional neural network. *Waste Management*, 2021, vol. 135, pp. 150–157.
10. Kai N., Dongbo Z., Feng Y. Rubbish detection and classification of intelligent sweeping robot based on visual perception. *Journal of Image and Graphics*, 2019, vol. 24 (8), pp. 1358–1368.
11. Yuchao C., Xiaoxiao B. Medical garbage classification system based on machine vision and deep learning. *Computer Programming Skills and Maintenance*, 2019, vol. 5, pp. 108–110.
12. Tachwali Y., Al-Assaf Y., Al-Ali A. Automatic multistage classification system for plastic bottles recycling. *Resources, Conservation and Recycling*, 2007, vol. 52, pp. 266–285.
13. Xiang Z., Peng X., Huanping G. Intelligent sorting trash can based on Arduino. *Electronic World*, 2020, vol. 4, pp. 160–161.
14. Makarov A.A., Solodkov B.E. Software development for the Arduino programmable platform based on the ATMEGA 328P microcontroller. *Design and technology*, 2014, no. 44 (86), pp. 88–91. (In Russ.)
15. Men'shikov S.V., Vashchuk E.S. Implementation of programming on the Arduino platform: ways and possibilities of using the Arduino UNO board. *Modern issues of natural science and economics: proceedings of the IV International Scientific and Practical Conference*. Prokopyevsk, Branch of the Gorbachev Kuzbass State Technical University Publ., 2022. pp. 256–262. (In Russ.)
16. Unajbaev B.Zh., Pak V.G., Zozulya E.S. A brief overview and prospects of using the Arduino microprocessor platform in the educational process. *Mechanics and technology*, 2019, no. 4 (66), pp. 193–198. (In Russ.)
17. Bykova A.V. Transmission of dynamic indicators from digital sensors via the Arduino NANO controller to the Arduino UNO controller. *Innovative scientific research*, 2021, no. 6-3 (8), pp. 264–269. (In Russ.)

18. Astafev V.Yu. Capabilities of the Arduino board for obtaining information from the environment. *Modern problems of geometric modeling and information technologies. Materials of the I Interregional scientific and practical Conference of teachers and students*. Melitopol, Melitopol State University Publ., 2023. pp. 121–129. (In Russ.)
19. Lukashik E.Ya. Using the Arduino platform to study the principle of operation of parametric sensors. *Collection of materials of the Republican scientific and practical conference with international participation dedicated to the 85th anniversary of the birth of Professor Mikhail Vladimirovich Borisyuk*. Grodno, Grodno State Medical University Publ., 2022. pp. 160–161. (In Russ.)
20. Bagutdinov R.A. Designing a modular multi-sensor system for environmental monitoring tasks based on Arduino. *Scientific Bulletin of Belgorod State University. Series: Economics. Computer science*, 2019, vol. 46, no. 1, pp. 173–180. (In Russ.)

Information about the authors

Liia N. Khasanova, Bachelor, Ufa University of Science and Technology, 32, Zaki Validi street, Ufa, 450076, Russian Federation, liyahasanovaa@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0006-3276-8630>

Polina N. Skuratova, Bachelor, Ufa University of Science and Technology, 32, Zaki Validi street, Ufa, 450076, Russian Federation, polina-skuratova@list.ru, <https://orcid.org/0009-0003-2318-130X>

Svetlana A. Musina, Senior Lecturer, Ufa University of Science and Technology, 32, Zaki Validi street, Ufa, 450076, Russian Federation, musina.sa@ugatu.su, <https://orcid.org/0009-0000-1117-1049>

Received: 26.03.2024

Revised: 25.10.2024

Accepted: 24.12.2024

УДК 622.06

DOI: 10.18799/24131830/2025/2/4480

Шифр специальности ВАК: 2.8.4

Анализ влияния свойств и конфигурации пласта на коэффициент извлечения нефти при разработке нефтегазоконденсатных месторождений

В.А. Кряжев, Я.А. Кряжев[✉], А.Я. Гильманов, А.П. Шевелёв

Тюменский государственный университет, Россия, г. Тюмень

[✉]kryazhev_yar@mail.ru

Аннотация. Актуальность. Существенная доля запасов нефти содержится в нефтяных оторочках газовых или газоконденсатных месторождений. Стратегия и очередность разработки нефтяных и газовых частей таких месторождений во многом определяет количество безвозвратно теряемой нефти при добыче. Эффективное использование выбранной стратегии разработки невозможно без учёта индивидуальных особенностей месторождения. **Цель:** анализ влияния конфигурации и свойств пласта и технологического режима эксплуатации скважин на коэффициент извлечения нефти для выбора наиболее эффективной стратегии разработки с помощью гидродинамического моделирования. **Методы.** Моделирование разработки нефтегазоконденсатного месторождения осуществляется в программном комплексе tНавигатор компании Rock Flow Dynamics на основе системы уравнений многофазной фильтрации. Проводится параметрический анализ влияния глубины водонефтяного контакта, типа нефтяной оторочки, стратегии разработки, анизотропии, проницаемости и М-фактора на зависимость коэффициента извлечения нефти от её дебита. **Результаты и выводы.** В результате моделирования было установлено, что первоочередная разработка нефтяной оторочки позволяет достичь больших коэффициентов извлечения нефти по сравнению с одновременной разработкой газовой шапки и нефтяной оторочки. В случае небольшого расстояния между поверхностями газонефтяного и водонефтяного контактов необходимо реализовывать сценарий, при котором добыча газа начинается практически одновременно с добычей нефти. Установлено, что наличие оптимального значения дебита нефти связано с тем, что дальнейшее увеличение дебита приводит к возрастанию перепада давления между газовой шапкой и нефтяной оторочкой в районе скважины, ускоряющего проявление эффекта конусообразования газа, причём это значение в два раза меньше полученного приближёнными аналитическими методами. Показано, что для нефтяных оторочек краевого типа величина латеральной проницаемости вносит больший вклад в проявление эффекта прорыва газа к добывающим скважинам, чем вертикальная. Для оторочки подстилающего типа, напротив, высокие значения коэффициента анизотропии пласта оказывают негативное влияние на нефтеотдачу.

Ключевые слова: нефтяные оторочки, нефтегазоконденсатные месторождения, коэффициент извлечения нефти, методы увеличения нефтеотдачи, стратегия разработки, фильтрация флюид

Для цитирования: Анализ влияния свойств и конфигурации пласта на коэффициент извлечения нефти при разработке нефтегазоконденсатных месторождений / В.А. Кряжев, Я.А. Кряжев, А.Я. Гильманов, А.П. Шевелёв // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 2. – С. 79–91. DOI: 10.18799/24131830/2025/2/4480

UDC 622.06

DOI: 10.18799/24131830/2025/2/4480

Analysis of formation properties and configuration impact on the oil recovery factor during the production of oil and gas condensate fields

V.A. Kriazhev, Ya.A. Kriazhev[✉], A.Ya. Gilmanov, A.P. Shevelev

University of Tyumen, Tyumen, Russian Federation

[✉]kryazhev_yar@mail.ru

Abstract. Relevance. A significant share of oil reserves is contained in the oil rims of gas or gas condensate fields. The strategy and sequence of development of oil and gas parts of such fields largely determines the amount of oil, which will not be produced. Effective use of the chosen development strategy is impossible without considering the individual characteristics of the reservoir. **Aim.** Analysis of the configuration and properties of the reservoir and the technological mode of operation impact on the oil recovery factor to select the most effective development strategy using reservoir simulation. **Methods.** Simulation of the development of an oil and gas condensate field is carried out in the tNavigator software package of Rock Flow Dynamics based on a system of multiphase filtration equations. The parametric analysis of the influence of the depth of the oil-water contact, the type of oil rim, the development strategy, anisotropy, permeability and M-factor on the dependence of the oil recovery factor on its flow rate is carried out. **Results and conclusions.** As a result of simulation, it was found that the primary development of the oil rim allows achieving large oil recovery factor compared with the simultaneous development of the gas cap and the oil rim. In the case of a small distance between the surfaces of gas-oil and water-oil contacts, it is necessary to implement a strategy, in which gas production begins almost simultaneously with oil production. It is established that the presence of an optimal oil flow rate is caused by increase in the pressure drop between the gas cap and the oil rim in the well area, accelerating the presence of the gas breakthrough to producers. It is shown that for edge-type oil rims, the lateral permeability value contributes more to the presence of the cone formation effect than the vertical one. In contrast, high values of the reservoir anisotropy coefficient have a negative impact on oil recovery for the underlying type of rim.

Keywords: oil rims, oil and gas condensate fields, oil recovery factor, enhanced oil recovery methods, development strategy, fluid filtration

For citation: Kriazhev V.A., Kriazhev Ya.A., Gilmanov A.Ya., Shevelev A.P. Analysis of formation properties and configuration impact on the oil recovery factor during the production of oil and gas condensate fields. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 2, pp. 79–91. DOI: 10.18799/24131830/2025/2/4480

Введение

Разработка нефтегазоконденсатных месторождений, включающих в себя залежи с газовыми шапками, активно осуществляется по всему миру. В частности, подобные месторождения есть в России [1–3], Нигерии [4, 5], в Средиземном море вблизи побережья Ливии [6]. В России пласты, содержащие газовые шапки, имеются на Самотлорском месторождении [1], в Удмуртии [2] и Красноярском крае [7]. Крупным нефтегазоконденсатным месторождением является Новопортовское месторождение на полуострове Ямал [3, 8]. Под газовой шапкой на этих месторождениях находится нефтенасыщенная зона, которая, в случае её малых размеров, называется нефтяной оторочкой [9, 10].

Разработка таких месторождений связана с рядом вызовов и сложностей. Существенное влияние на конечный коэффициент извлечения нефти (КИН) оказывает выбор стратегии разработки месторождения [1]. Выбор последовательности разработки между нефтяной оторочкой и газовой шапкой залежи осуществляется на основании экономической эффективности, во многом связанной с целевым продуктом компании и соотношением развитости нефтяной и газовой инфраструктуры района залегания углеводородов. Так, например, для газодобывающих компаний, обладающих лицензиями на разработку нефтегазовых/нефтегазоконденсатных месторождений со слабо развитой нефтяной инфраструктурой, приоритетным является разработка газовых шапок. Первоочередная разработка газовой шапки хотя и характеризуется высокими темпами отбора газа, но способна привести к существенному падению пластового давления, что впоследствии приве-

дет к перетоку нефти из оторочки в газонасыщенную область [11, 12]. Добыча нефти из этой области проблематична и требует разработки специальных проектов и способов [1]. Для компаний, специализирующихся на добыче нефти, первоочередной задачей является извлечение запасов нефти. Считается, что в случае первоочередной разработки нефтяной оторочки можно получить более высокие значения КИН за счет отсутствия эффекта расформирования нефтенасыщенной зоны, но в этом случае неизбежен прорыв газа в добывающие скважины [9], что приведет к невозможности эффективной эксплуатации нефтяных скважин. Одновременная разработка нефтяной оторочки и газовой шапки является компромиссным вариантом, когда добывается и нефть, и газ в некоторых средних количествах, обеспечивающих контролируемое движение контактов [13]. Однако при этом всё равно возможны перетоки фаз из одной области в другую, что затруднит последующее извлечение нефти.

Для предотвращения перетока газа в область нефтяной оторочки возможно использование технологии барьерного заводнения [2, 14], когда вода закачивается в область газонефтяного контакта (ГНК) для образования устойчивой границы между газовой шапкой и нефтяной оторочкой. Однако эта технология требует дополнительных затрат при её проведении и моделировании необходимых объёмов закачки, бурения дополнительных скважин. Вместо воды также возможна закачка пен [15] с этой же целью, но и эта технология не лишена указанных недостатков.

В некоторых случаях [8, 16] возможна разработка нефтяной оторочки, в дополнение к этому может

быть организован сайклинг-процесс для поддержания пластового давления в газовой шапке, хотя такая технология в конечном итоге не способна полностью блокировать перетоки нефти из оторочки в газовую шапку.

Отсутствие универсального способа разработки месторождений с газовыми шапками приводит к необходимости обоснования выбора стратегии их разработки. Практика показывает, что на нефтеотдачу существенное влияние оказывает величина остаточной нефтенасыщенности в газовой шапке [17], размер оторочки, фильтрационно-емкостные свойства пласта [4, 9, 16]. От этих параметров зависит эффективность и стратегия разработки. Однако полноценного анализа влияния параметров пласта на коэффициент извлечения нефти и газа с рассмотрением физических процессов, протекающих при разработке месторождения с газовой шапкой, к настоящему времени проведено не было. Это обуславливает актуальность настоящей работы.

Выбор стратегии разработки нефтегазовых и нефтегазоконденсатных залежей затруднителен без предварительного моделирования процесса с целью прогноза основных технологических параметров и принятия в качестве реализуемого одного из вариантов по конечным значениям коэффициентов извлечения. Обычно для этого используются гидродинамические симуляторы [1, 4, 9]. Кроме того, учитываются экономические затраты и прибыль от добычи углеводородов.

Целью работы является анализ влияния конфигурации и свойств пласта и технологического режима эксплуатации скважин на коэффициент извлечения нефти для выбора наиболее эффективной стратегии разработки с помощью гидродинамического моделирования. В статье впервые вводятся безразмерные комплексы подобия для классической гидродинамической модели фильтрации флюида в пористой среде.

Безразмерная математическая модель фильтрации флюида в пористой среде

Пусть рассматривается декартова прямоугольная система координат, в которой x , y , z – пространственные координаты. Модель «чёрной нефти» подразумевает наличие следующих фаз: вода, нефть с растворённым в ней газом и газ в свободном состоянии. При этом компонентный состав фаз не учитывается. В этом случае классическая система уравнений механики многофазных сред записывается следующим образом [18]:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(m \rho_{wm0} \frac{S_w}{B_w} \right) = \operatorname{div} \left(\rho_{wm} \left[\frac{k k_{rw}}{\mu_w B_w} (\nabla p_w - \rho_w g \nabla z) \right] \right) + q_w, \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(m \rho_{omo} \left[\frac{S_o}{B_o} + R_{og} \frac{S_g}{B_g} \right] \right) = \operatorname{div} \sum_{n=o,g} \left(x_{on} \rho_{nm} \left[\frac{k k_{rn}}{\mu_n B_n} (\nabla p_n - \rho_n g \nabla z) \right] \right) + q_o, \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(m \rho_{gmo} \left[\frac{S_g}{B_g} + R_{go} \frac{S_o}{B_o} \right] \right) = \operatorname{div} \sum_{n=o,g} \left(x_{gn} \rho_{nm} \left[\frac{k k_{rn}}{\mu_n B_n} (\nabla p_n - \rho_n g \nabla z) \right] \right) + q_g, \quad (3)$$

$$p_o - p_g = p_{cog}, \quad (4)$$

$$p_o - p_w = p_{cow}, \quad (5)$$

$$\sum_{n=o,w,g} S_n = 1, \quad (6)$$

где t – время; m – коэффициент динамической пористости; n – индекс фазы (индекс o означает нефть, w – воду, g – газ); ρ_n , ρ_{nm} и ρ_{nm0} – соответственно удельная масса n -ой фазы, плотность одного моля n -й фазы в пластовых и в стандартных условиях; S_n – насыщенность порового пространства n -й фазой; B_n – объёмный коэффициент n -й фазы; k – абсолютная проницаемость пласта; k_{rn} – относительная фазовая проницаемость n -й фазы; μ_n – коэффициент динамической вязкости n -й фазы; p_n – давление n -й фазы в поровом пространстве; g – ускорение свободного падения; q_n – удельный поток массы n -ой фазы; R_{og} и R_{go} – объёмная растворимость нефти в газе и газа в нефти соответственно; x_{on} и x_{gn} – мольная концентрация нефти в n -й фазе и газа в n -й фазе соответственно; p_{cog} и p_{cow} – капиллярные давления в системе нефть–газ и нефть–вода соответственно.

Уравнения (1)–(3) представляют собой законы сохранения массы воды, нефти и газа с учётом закона Дарси. Левая часть уравнений характеризует изменение массы соответствующей фазы в выделенном объёме пористой среды в единицу времени, причём в уравнениях (2) и (3) первое слагаемое учитывает изменение массы чистой нефти или газа, а второе – растворённой нефти в газе или растворённого газа в нефти. Дивергентное слагаемое в правой части показывает конвективные потоки массы этой фазы, причём первое слагаемое соответствует потоку в латеральном направлении, а второе – потоку из-за наличия гидростатического давления. Последнее слагаемое в правой части учитывает объёмные источники массы соответствующей фазы. Уравнения (4) и (5) позволяют рассчитать по определению капиллярные давления в системах нефть–газ и нефть–вода. Последнее соотношение (6) является замыкающим и учитывает, что сумма насыщенностей фаз равна 1.

Неизвестными в системе уравнений (1)–(6) являются насыщенности и давления фаз. Для решения системы уравнений (1)–(6) необходимо задание начальных и граничных условий. Моделируется

залежь нефти с газовой шапкой, водонасыщенность вне водоносной зоны W равна минимальной – связанной водонасыщенности S_{wr} , в области воды W водонасыщенность равна максимальной:

$$\begin{aligned} S_w(t=0, M(x, y, z) \in W) &= 1, \\ S_w(t=0, M(x, y, z) \notin W) &= S_{wr}, \end{aligned} \quad (7)$$

где M – некоторая точка.

Газ имеет максимальную насыщенность в области газовой шапки G , в остальной части месторождения он отсутствует:

$$\begin{aligned} S_g(t=0, M(x, y, z) \in G) &= 1 - S_{wr} - S_{or}, \\ S_g(t=0, M(x, y, z) \notin G) &= 0, \end{aligned} \quad (8)$$

где S_{or} – остаточная нефтенасыщенность.

Давление в начальный момент времени равно невозмущённому пластовому p_r :

$$p_n(t=0, x, y, z) = p_r. \quad (9)$$

Месторождение имеет непроницаемые границы, поэтому граничные условия имеют вид:

$$\left. \frac{\partial p_n}{\partial N_j} \right|_{G_j} = 0, n = o, w, g, \quad (10)$$

где N_j – нормаль к j -й границе G_j .

Такой вид граничных условий является типовым для рассматриваемых месторождений.

Для проведения анализа чувствительности и оценки влияющих параметров на разработку месторождения с газовой шапкой необходимо провести обезразмеривание системы уравнений (1)–(6). Для этого вводятся следующие безразмерные параметры:

$$\begin{aligned} D_{fm0} &= \frac{\rho_{fm0}}{\rho_{wm0}}, \\ D_{nm} &= \frac{\rho_{nm}}{\rho_{wm0}}, \\ Q_f &= \frac{q_f}{q_w}, \\ P_{cof} &= \frac{p_{cof}}{p_r}, f \neq o, \end{aligned}$$

где $f=o, w, g$ – индекс фазы, определяемые по уравнению, описывающему поведение этой фазы; R_{fm0} – безразмерная молярная плотность фазы f в стандартных условиях; R_{nm} – безразмерная плотность n -й фазы; Q_f – безразмерный удельный поток массы фазы f , а также вводятся безразмерное давление n -й фазы P_n , безразмерное время T и безразмерные координаты X_1, X_2, X_3 следующим образом:

$$\begin{aligned} P_n &= \frac{p_n}{p_r}, \\ T &= \frac{t}{t_0}, \\ X_1 &= \frac{x}{L_1}, \end{aligned}$$

$$X_2 = \frac{y}{L_2},$$

$$X_3 = \frac{z}{L_3},$$

где L_i – размер области по координате X_i , $i=1, 2, 3$ – индекс по координате, а характерное время вводится как

$$t_0 = \frac{\rho_{wm0}}{q_w}.$$

В этом случае система уравнений (1)–(6) записывается в безразмерном виде следующим образом:

$$\frac{\partial}{\partial T} \left(m D_{fm0} \left(\frac{S_f}{B_f} + \sum_{l \neq f} \left(R_{fl} \frac{S_l}{B_l} \right) \right) \right) = C,$$

$$\begin{aligned} C &= \sum_{i=1}^3 \frac{\partial}{\partial X_i} \sum_n \left(x_{fn} D_{nm} \sum_{j=1}^3 \left(A_{ijn} \frac{\partial P_n}{\partial X_j} - B_{ijn} \frac{\partial X_3}{\partial X_j} \right) \right) + \\ &+ Q_f, f = w, o, g, l = o, g, \end{aligned} \quad (11)$$

$$P_o - P_f = P_{cof}, f = w, g, \quad (12)$$

где i, j – индексы по координате; l – индекс фазы. К уравнениям (11) и (12) добавляется уравнение (6) в неизменном виде. Здесь введены следующие безразмерные комплексы подобия:

$$A_{ijn} = \frac{k_i k_{rn} p_r \rho_{wm0}}{\mu_n B_n q_w L_i L_j}, \quad (13)$$

$$B_{ijn} = \frac{k_i k_{rn} \rho_n \rho_{wm0} g L_3}{\mu_n B_n q_w L_i L_j}. \quad (14)$$

Кроме того,

$$R_{wl} = 0, l = o, g,$$

$$x_{fw} = 0, f = o, g,$$

$$x_{fn} = 1, n = f,$$

$$x_{wn} = 0, n = o, g.$$

Начальные условия (7)–(9) в безразмерном виде являются следующими:

$$S_w(T=0, M(X_1, X_2, X_3) \in W) = 1 - S_{or},$$

$$S_w(T=0, M(X_1, X_2, X_3) \notin W) = S_{wr},$$

$$S_g(T=0, M(X_1, X_2, X_3) \in G) = 1 - S_{wr} - S_{or},$$

$$S_g(T=0, M(X_1, X_2, X_3) \notin G) = 0,$$

$$P(T=0, X_1, X_2, X_3) = 1.$$

Граничные условия (10) при обезразмеривании записываются как:

$$\left. \frac{\partial P_n}{\partial N_j} \right|_{G_j} = 0, n = o, w, g.$$

Физический смысл безразмерного комплекса A_{ijn} заключается в том, что он является отношением осреднённой скорости фильтрации n -й фазы по laterали в пласте к скорости фильтрации воды из

объёмных источников в пласте. Аналогично безразмерный комплекс B_{ijn} характеризует отношение осреднённой скорости фильтрации n -й фазы по вертикали в пласте к скорости фильтрации воды из объёмных источников в пласте.

Анализ чувствительности модели

Первичный анализ чувствительности модели показывает, что в случае малости R_{fl} можно пренебречь слагаемым S_k/B_k (поскольку доля f -й фазы в l -й фазе мала). В случае месторождения с газовой шапкой можно считать, что $R_{og} \ll 1$. Если $Q_f \ll 1$, то можно пренебречь влиянием скважин по этой фазе, а если скважин несколько, то, если для какой-то скважины с индексом a $Q_{fa} \ll 1$, можно пренебречь влиянием этой скважины по фазе f в силу малого расхода.

Физический анализ процесса свидетельствует, что в случае разработки оторочки краевого типа горизонтальные потоки будут преобладать над вертикальными, поэтому отношение введённых безразмерных комплексов B_{ijn}/A_{ijn} практически не будет влиять на коэффициент извлечения нефти, а на сам процесс фильтрации в большей степени влияет комплекс A_{ijn} . Напротив, при наличии оторочки подстилающего типа поток газа в нефтенасыщенную область происходит преимущественно в вертикальном направлении. В таком случае анизотропия пласта (и отношение B_{ijn}/A_{ijn}) оказывает существенное влияние на КИН. Наиболее благоприятные условия для добычи нефти из оторочек подстилающего типа соответствуют низким значениям коэффициента анизотропии, поэтому при значениях $B_{ijn}/A_{ijn} < 10^{-3}$ целесообразно разрабатывать оторочки подстилающего типа, в ином случае – только оторочки краевого типа. Значение 10^{-3} учитывает разницу вертикального и горизонтального градиентов давлений на 2 порядка, что обычно наблюдает-

ся на практике, и коэффициент анизотропии пласта порядка 0,1.

При рассмотрении нефтяной оторочки краевого типа, как отмечалось выше, в соответствии с (11), (12) фильтрация флюидов в пласте и распределение насыщенностей определяются только дебитами скважин, а не первоочередностью потоков из нефтяной оторочки или газовой шапки, поэтому A_{zjn} и B_{zjn} малы в сравнении с остальными комплексами. Асимптотический анализ предполагает устремление значений безразмерных комплексов (13) и (14) к нулю: $A_{xjn} \rightarrow 0$, $A_{yjn} \rightarrow 0$ и $B_{xjn} \rightarrow 0$, $B_{yjn} \rightarrow 0$. В размерном виде это соответствует случаю $k_x \rightarrow 0$ и $k_y \rightarrow 0$. Следовательно, в таком случае продвижение газа из газовой шапки будет незначительным и возможен выбор как совместной разработки нефтяной оторочки и газовой шапки, так и первоочередной разработки нефтяной оторочки, КИН должен сохранять своё значение вне зависимости от выбранного варианта.

Подробный анализ чувствительности, в том числе для подтверждения вышеприведённых рассуждений, проводился на основе многовариантных расчетов моделей. Для гидродинамического моделирования использовался симулятор tНавигатор компании Rock Flow Dynamics. В качестве объектов исследования выступали синтетические модели пластов с конфигурацией залежей, соответствующих одному из месторождений Западной Сибири: пластово-сводовой нефтегазоконденсатной залежи с нефтяной оторочкой краевого типа (рис. 1) и массивной нефтегазоконденсатной залежи (НГКЗ) с подстилающей нефтяной оторочкой (НО) (рис. 2). Следует отметить, что, в отличие от залежи с краевой нефтяной оторочкой, залежь с подстилающей оторочкой характеризуется отсутствием чисто нефтяной зоны.

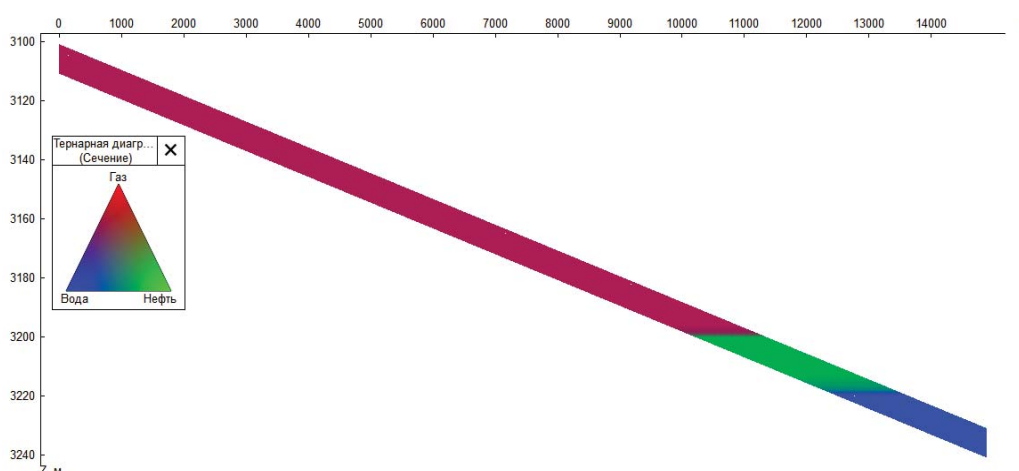


Рис. 1. Геологический разрез куба характера насыщения в нефтегазоконденсатной залежи с нефтяной оторочкой краевого типа

Fig. 1. Geological section of a cube of saturation character in an oil and gas condensate reservoir with an oil rim of marginal type

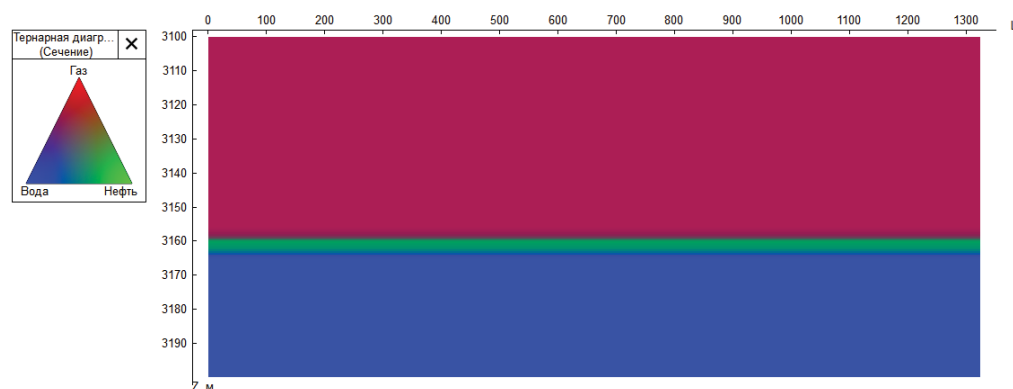


Рис. 2. Геологический разрез куба характера насыщения в нефтегазоконденсатной залежи с подстилающей нефтяной оторочкой

Fig. 2. Geological section of a cube of saturation character in an oil and gas condensate reservoir with an underlying oil rim

Таблица 1. Усредненные свойства пластов и насыщающих их флюидов нижнемеловых отложений месторождения Западной Сибири

Table 1. Average properties of formations and fluids saturating them in the Lower Cretaceous deposits of Western Siberia

Параметр Parameter	НГКЗ с НО краевого типа Oil and gas condensate reservoir (OGCR) with an oil rim (OR) of marginal type	НГКЗ с подстилающей НО OGCR with an underlying OR
Эффективная нефтенасыщенная толщина, м Effective oil-saturated thickness, m	7,2	5,0
Эффективная газонасыщенная толщина, м Effective gas-saturated thickness, m	10,0	30,0
Отношение порового объема газонасыщенной части к поровому объему нефтенасыщенной части залежи (М-фактор) Ratio of the pore volume of the gas-saturated part to the pore volume of the oil-saturated part of the reservoir (M-factor)	4,75	6,31
Пористость, д. ед. Porosity, units	0,16	0,16
Абсолютная проницаемость, мД Absolute permeability, mD	30,0	30,0
Коэффициент анизотропии пласта Reservoir anisotropy factor	0,1	0,1
Начальное пластовое давление, МПа Initial reservoir pressure, MPa	33,2	33,1
Плотность нефти, кг/м ³ Oil density, kg/m ³	886,0	886,0
Плотность воды, кг/м ³ Water density, kg/m ³	999,0	999,0
Плотность газа, кг/м ³ Gas density, kg/m ³	0,79	0,79
Динамическая вязкость нефти в пластовых условиях, сП Dynamic oil viscosity in reservoir conditions, cP	0,54	0,54
Динамическая вязкость газа в пластовых условиях, сП Dynamic gas viscosity in reservoir conditions, cP	0,0276	0,0276
Объемный коэффициент нефти, м ³ /м ³ Oil formation volume factor, m ³ /m ³	1,25	1,25
Объемный коэффициент газа, м ³ /м ³ Gas formation volume factor, m ³ /m ³	0,003895	0,003895
Начальное газосодержание нефти, м ³ /м ³ Initial gas saturation in oil	132,3	132,3
Потенциальное содержание конденсата в газе, м ³ /м ³ Potential condensate saturation in gas, m ³ /m ³	0,000149	0,000149
Сжимаемость породы, 1/МПа Rock compressibility, 1/MPa	0,0005	0,0005
Глубина водонефтяного контакта (ВНК), м Oil-water contact (OWC) depth, m	3220	3165
Глубина газонефтяного контакта (ГНК), м Gas-oil contact (GOC) depth, m	3200	3160

В качестве базового варианта, относительно которого анализировалась чувствительность, были выбраны усредненные параметры залежей рассматриваемого месторождения (табл. 1). PVT-модель принята на основе данных исследований пластовых проб флюидов нижнемеловых отложений, тип модели – модель чёрной нефти с газоконденсатной опцией. Относительные фазовые проницаемости были заданы на основе анализа результатов специальных исследований керна рассматриваемых залежей – при помощи ключевых слов SWFN, SGFN и SOF3.

Относительные фазовые проницаемости приведены на рис. 3.

В качестве варьируемых параметров выступали: М-фактор, абсолютная проницаемость пласта, коэффициент анизотропии пласта, темпы отбора газа из газовой шапки (ГШ), ограничение по дебиту нефти скважин, положение водонефтяного контакта (ВНК). В связи с проведением большого количества расчетов путем перебора всех возможных комбинаций варьируемых параметров (табл. 2) для оптимизации временных ресурсов расчетный период моделей был принят равным 20 годам. Разработка НО и ГШ моделировалась на режиме истощения пластовой энергии. Система разработки НО рядная с использованием горизонтальных скважин с межрядным расстоянием 450 м. Вертикальные скважины ГШ располагались по равномерной сетке. В табл. 2 представлен дебит нефти, соответствующий создаваемой депрессии посредством из-

менения забойного давления. Рассматриваемые величины выбраны на основе диапазона фактических дебитов горизонтальных нефтяных скважин месторождений моделируемой группы. Рассмотрение двух значений темпов отбора газа из ГШ имитирует два сценария – отсутствие разработки ГШ во время выработки запасов нефти и ведение одновременной разработки НО и ГШ, причем темпы отбора ГШ определены средним экономически обоснованным на месторождениях моделируемой группы фактическим темпом отборов 3,5 %.

Таблица 2. Варьируемые параметры моделей

Table 2. Variable model parameters

Параметр Parameter	Кол-во значений Number of values	Значения Values
Абсолютная проницаемость, мД Absolute permeability, mD	5	1; 10; 30; 100; 1000
Коэффициент анизотропии пласта Reservoir anisotropy factor	4	0,05; 0,1; 0,5; 1
Расстояние между ВНК и ГНК, м Distance between OWC and GOC, m	6	5; 10; 15; 20; 25; 30
Множитель М-фактора M-factor multiplier	6	0,1; 0,5; 1; 2; 3; 4
Дебит нефти сегмента горизонтальной скважины (25 м), м³/сут Oil flow rate of a horizontal well segment (25 m), m³/day	4	0,1; 0,5; 1; 5
Темпы отбора газа, % Gas withdrawal rates, %	2	0; 3,5

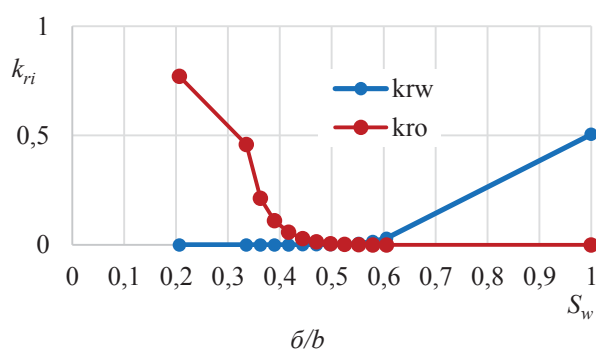
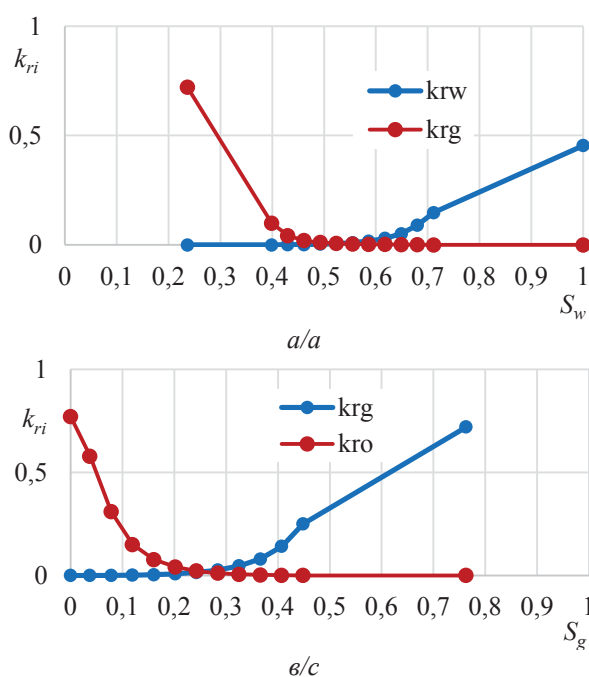


Рис. 3. Относительные фазовые проницаемости: а) в системе вода–газ; б) в системе вода–нефть; в) в системе газ–нефть

Fig. 3. Relative phase permeabilities: a) in the water–gas system; b) in the water–oil system; c) in the gas–oil system

Расчеты проводились на 2D-моделях в разрезе координатной плоскости Oxz (рис. 1, 2), геометрические размеры ячеек $25 \times 0,25$ м. Данное допущение является обоснованным в случае рассмотрения рядной системы размещения нефтяных горизонтальных скважин, что в настоящее время является наиболее распространенной практикой при разработке НО в условиях невозможности применения вертикальных или наклонно-направленных скважин по причине конусообразования газа при эксплуатации на высоких депрессиях, обеспечивающих рентабельные дебиты. При этом плоскость 2D-модели располагается перпендикулярно стволу горизонтальной нефтяной скважины, имитируя эксплуатацию сегмента скважины (рис. 4). Описанный подход используется специалистами ООО «Газпромнефть НТЦ» и зарекомендовал себя на практике [19].

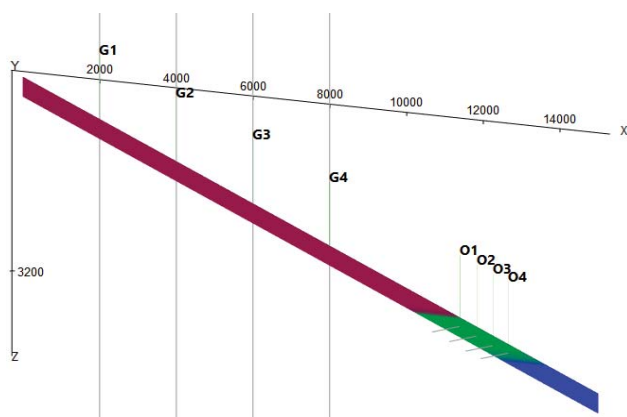


Рис. 4. Размещение газовых и нефтяных скважин в нефтегазоконденсатной залежи с оторочкой краевого типа

Fig. 4. Placement of gas and oil wells in oil and gas condensate deposits with an edge-type rim

При варьировании параметров пласта системы разработки ГШ и НО не подвергались корректировке. Следует отметить, что варьирование уровня ВНК в залежи с оторочкой краевого типа приводит к изменению площади нефтеносности, в связи с чем количество нефтяных скважин изменялось с учетом соблюдения заданного межрядного расстояния.

Выбытие нефтяных скважин из действующего фонда осуществлялось при достижении газового фактора $2500 \text{ м}^3/\text{т}$ или обводненности 98 % [20].

При разработке нефтегазоконденсатных залежей первоочередная добыча газа не является эффективной, поскольку в этом случае КИН имеет невысокие значения [21] вследствие расформирования нефтяной оторочки. Исходя из этого, следует сравнить две стратегии разработки: одновременную

разработку ГШ и НО и первоочередную разработку НО с вводом ГШ после извлечения основных запасов нефти.

Результаты расчетов

Для обеих стратегий разработки сначала исследовалось влияние ограничения дебита сегмента нефтяных скважин Q_o на результирующий КИН при различных положениях ВНК с фиксированной глубиной ГНК.

Полученная зависимость на примере оторочки краевого типа для первоочередной разработки НО приведена на рис. 5, для совместной разработки ГШ и НО – на рис. 6 (темпы отбора газа ГШ – 3,5 %). Анализ проведен для всех комбинаций параметров табл. 2. Представлены наиболее значимые результаты.

Анализ полученных зависимостей в обоих случаях свидетельствует о наличии максимального КИН при некотором значении дебита нефти. Это обусловлено тем, что обеспечение высоких дебитов нефти требует поддержания высоких депрессий, что приводит к более стремительному прорыву газа ГШ к добывающим скважинам, препятствующему фильтрации нефти.

При небольших значениях дебита нефти невысокие значения КИН обусловлены ограниченностью расчетного периода, добывающие скважины в данном случае не используют весь свой потенциал. При обеих стратегиях разработки с ростом глубины ВНК максимальный КИН увеличивается в силу снижения доли контактных с ГШ запасов нефти и расширения чисто-нефтяной зоны. Кроме того, отмечается увеличение оптимального дебита нефти при рассмотрении одновременной добычи нефти и газа по сравнению с первостепенной разработкой НО, что связано со снижением активности газовой шапки в процессе конусообразования и, как следствие, с возможностью использования более высоких депрессий. Значения оптимальных дебитов для предотвращения конусообразования при совместной разработке НО краевого типа и ГШ, полученные аналитическими методами (с помощью закона Дарси), оказываются завышенными в 2 раза из-за их приближенных оценок.

При сопоставлении графиков изменения КИН от глубины ВНК, соответствующих первоочередной разработке НО краевого типа и одновременной разработке НО и ГШ (рис. 7), можно сделать вывод о превышении КИН при рассмотрении первостепенной разработки оторочки на большей части рассматриваемого диапазона значений ВНК, что говорит о преобладании процесса расформирования оторочки над процессом конусообразования при относительно большом расстоянии между ГНК и ВНК в случае одновременного извлечения нефти и газа. Однако в

случае с высокой долей контактных запасов нефти при малых глубинах ВНК (3205 м на графике) одновременная разработка ГШ и НО характеризуется большей эффективностью по извлечению нефти. Таким образом, разработка ГШ в процессе эксплуатации НО положительно сказывается на КИН при малом расстоянии между ГНК и ВНК.

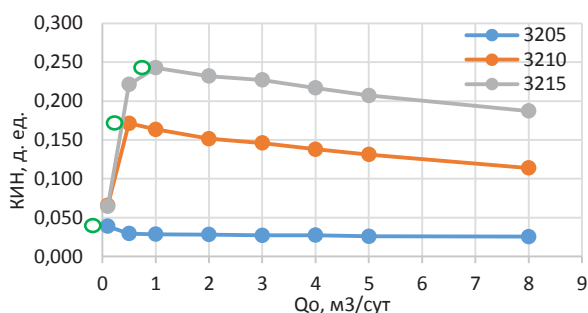


Рис. 5. Зависимость КИН от дебита нефти при различных глубинах ВНК (в м), указанных в легенде, для первоочередной разработки нефтяной оторочки краевого типа

Fig. 5. Dependence of oil recovery factor on oil production rate at various depths of OWC (in m) indicated in the legend for the priority production of an edge-type oil rim

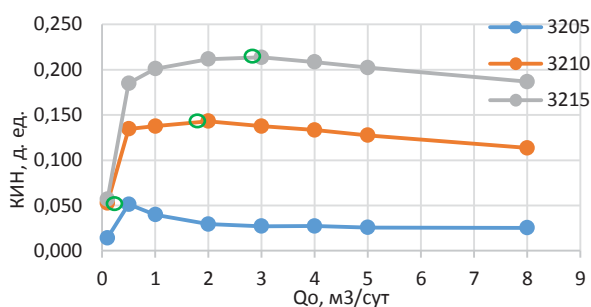


Рис. 6. Зависимость КИН от дебита нефти при различных глубинах ВНК (в м), указанных в легенде, для совместной разработки нефтяной оторочки краевого типа и газовой шапки

Fig. 6. Dependence of oil recovery factor on oil production rate at various water-oil contact depths (in m) indicated in the legend for the joint production of an edge-type oil rim and a gas cap

Анализ чувствительности модели также свидетельствует о том, что значения анизотропии проницаемости (отношения вертикальной проницаемости k_z к горизонтальной) практически не влияют на коэффициент извлечения нефти (рис. 8) в случае оторочки краевого типа, поскольку при таком строении залежи процесс продвижения газа к нефтяным скважинам в большей степени определяется латеральной проницаемостью. Это означает, что в данном случае отношение введенных безразмерных комплексов B_{ijn}/A_{ijn} практически не влияет на КИН,

как и отмечалось в критериальном анализе выше. Напротив, при рассмотрении оторочки подстилающего типа анизотропия пласта (и отношение B_{ijn}/A_{ijn}), как и ожидалось, оказывает существенное влияние на КИН. Наиболее благоприятные условия для добычи нефти из оторочек подстилающего типа соответствуют значениям $B_{ijn}/A_{ijn} < 10^{-3}$ (коэффициенты анизотропии $< 0,1$) (рис. 9).

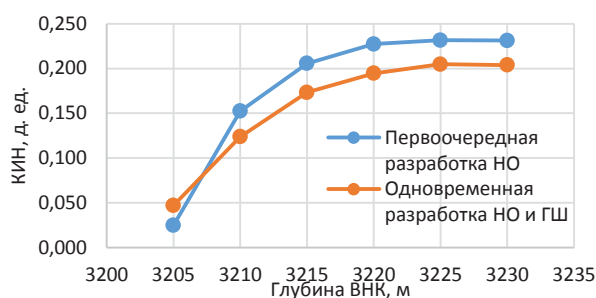


Рис. 7. Зависимость КИН от дебита нефти при различных глубинах ВНК (в м), указанных в легенде, для совместной разработки нефтяной оторочки краевого типа и газовой шапки

Fig. 7. Dependence of the oil recovery factor on the oil flow rate at various depths of the oil-water contact (in m) indicated in the legend for the joint production of an edge-type oil rim and gas cap

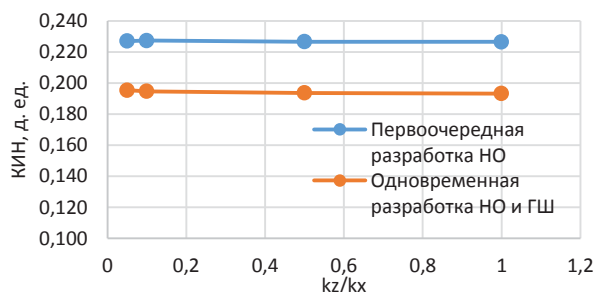


Рис. 8. Зависимость КИН оторочки краевого типа от коэффициента анизотропии проницаемости

Fig. 8. Dependence of the oil recovery factor of an edge-type rim on the permeability anisotropy coefficient

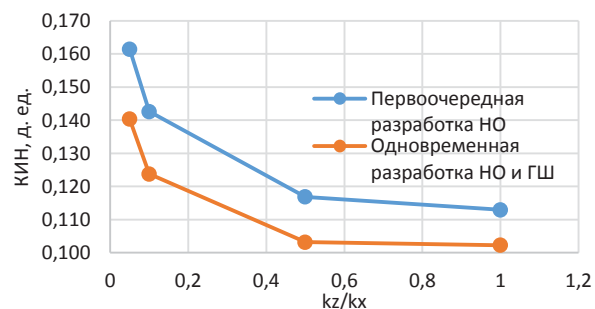


Рис. 9. Зависимость КИН оторочки подстилающего типа от коэффициента анизотропии проницаемости

Fig. 9. Dependence of the oil recovery factor of the underlying type rim on the permeability anisotropy coefficient

При рассмотрении влияния абсолютной проницаемости пласта на величину нефтеотдачи для нефтяной оторочки краевого типа наблюдается увеличение разницы КИН между сценариями первоочередной разработки НО и одновременной разработки НО и ГШ при увеличении абсолютной проницаемости (рис. 10). Кроме того, при крайне низких значениях абсолютной проницаемости процессами продвижения газа ГШ к нефтяным скважинам можно пренебречь, в данном случае разница КИН стремится к нулю при уменьшении проницаемости. Этот вывод подтверждается асимптотическим анализом безразмерной модели, проведённым выше.

В свою очередь, для нефтяной оторочки подстилающего типа латеральная проницаемость оказывает незначительное влияние на эффект конусообразования газа, о чем свидетельствуют результаты расчетов, представленные на рис. 11. В данном случае разница КИН между стратегиями разработки ГШ характеризуется слабой изменчивостью.

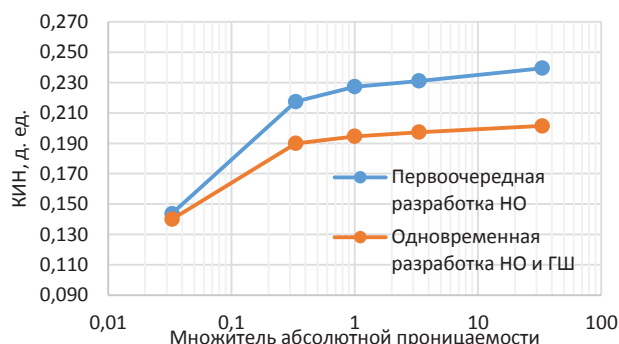


Рис. 10. Зависимость КИН оторочки краевого типа от множителя абсолютной проницаемости (базовое значение $k_x = 30$ мД)

Fig. 10. Dependence of the oil recovery factor of an edge-type rim on the absolute permeability multiplier (basic value $k_x = 30$ mD)

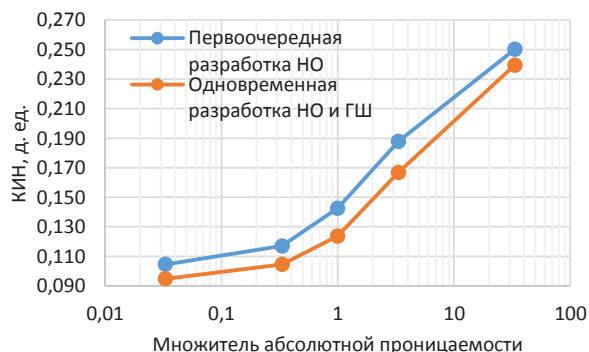


Рис. 11. Зависимость КИН оторочки подстилающего типа от множителя абсолютной проницаемости (базовое значение $k_x = 30$ мД)

Fig. 11. Dependence of the oil recovery factor of the underlying rim on the absolute permeability multiplier (basic value $k_x = 30$ mD)

В работе также был проведен анализ влияния объемов ГШ на КИН оторочек различного типа (рис. 12, 13). Для обеих рассматриваемых конфигураций залежей характерен рост КИН при увеличении ГШ, которая, в свою очередь, способствует вытеснению нефти к добывающим скважинам. При этом для сценария первоочередной разработки рост КИН является более интенсивным по сравнению с одновременной разработкой ГШ и НО. Данное обстоятельство связано с использованием фиксированных темпов отбора газа в размере 3,5 % от начальных геологических запасов газа независимо от размеров ГШ.

Также характерным участком графиков является область с низкими значениями множителей М-фактора, что имитирует отсутствие ГШ. На данном участке наблюдается существенное сокращение разницы КИН между сценариями разработки с различной очередностью. При низких значениях М-фактора объем газа мал, относительные фазовые проницаемости газа малы, поэтому A_{ijg} и B_{ijg} стремятся к нулю. Тогда фильтрация флюидов в пласте, согласно (21), определяется только нефтяной и водной фазами, разница КИН между стратегиями разработки при низких значениях М-фактора стремится к нулю.

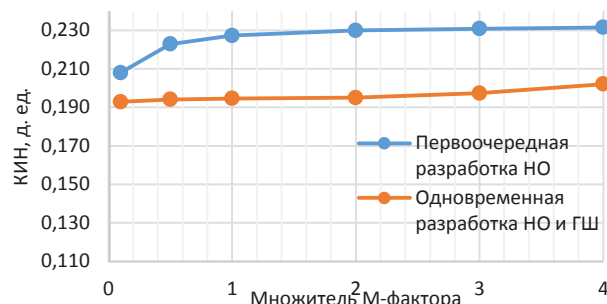


Рис. 12. Зависимость КИН оторочки краевого типа от множителя М-фактора

Fig. 12. Dependence of the oil recovery factor of an edge-type rim on the M-factor multiplier

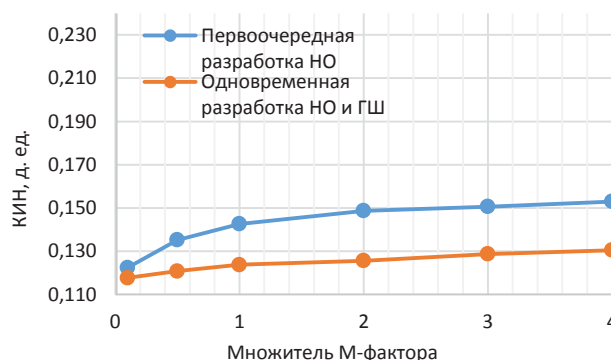


Рис. 13. Зависимость КИН оторочки подстилающего типа от множителя М-фактора

Fig. 13. Dependence of the oil recovery factor of the underlying rim on the M-factor multiplier

Стоит отметить, что при малых значениях М-фактора целесообразнее рассматривать эксплуатацию нефтяной части залежи с реализацией закачки воды в пласт, что способствует увеличению КИН и не приведет к существенному «проталкиванию» нефти в газонасыщенную часть.

Заключение

На основе детальных многовариантных расчетов в гидродинамическом симуляторе tНавигатор был выполнен анализ влияния параметров пласта с нефтегазоконденсатными залежами различных конфигураций на величину конечного КИН. В большинстве рассмотренных случаев первоочередная разработка нефтяных оторочек характеризуется большим нефтеизвлечением по сравнению со сценарием одновременной разработки газовой шапки и нефтяной оторочки. Стоит отметить, что более ранний ввод газовой шапки может способствовать увеличению экономической эффективности разработки нефтегазоконденсатной залежи в целом при несущественном снижении КИН. При рассмотрении залежей с малым расстоянием между ГНК и ВНК для предотвращения интенсивного загазовывания нефтяных скважин и увеличения КИН ввод газовых скважин в эксплуатацию является необходимым.

Анализ зависимостей КИН от ограничения дебита нефти скважин свидетельствует о существовании оптимального значения дебита для максимизации КИН. Наличие оптимального значения дебита нефти связано с тем, что дальнейшее увеличение

дебита приводит к возрастанию перепада давления между газовой шапкой и нефтяной оторочкой в районе скважины, ускоряющего проявление эффекта конусообразования газа.

Тип нефтегазоконденсатной залежи определяет наиболее влияющие на КИН параметры. Так, для нефтяных оторочек краевого типа величина латеральной проницаемости вносит больший вклад в проявление эффекта конусообразования, чем вертикальная. Для оторочки подстилающего типа, напротив, высокие значения коэффициента анизотропии пласта оказывают негативное влияние на нефтеотдачу в связи с интенсивным продвижением газа газовой шапки к нефтяным скважинам.

В работе впервые введены безразмерные комплексы для гидродинамической модели фильтрации флюидов в пласте, позволяющие охарактеризовать особенности влияния свойств пласта на добычу нефти.

Результаты расчетов моделей на гидродинамическом симуляторе подтверждают выводы, полученные на основе асимптотического анализа безразмерной модели фильтрации флюидов в пласте.

В перспективе развития данной тематики для оперативной оценки эффективности сценариев разработки нефтегазоконденсатных залежей при различной последовательности разработки нефтяной и газовой частей существует необходимость в создании универсального инструмента с привлечением экономических показателей и алгоритмов Machine Learning.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Смирнов Д.С., Ланина О.В. Особенности разработки подгазовой зоны и газовой шапки залежи АВ1-5 Самотлорского месторождения // Экспозиция Нефть Газ. – 2018. – № 7 (67). – С. 24–27.
2. Особенности разработки карбонатных пластов месторождений ОАО «Удмуртнефть» с нефтяными оторочками и газовыми шапками с применением барьерного заводнения / А.Ю. Топал, В.В. Фирсов, А.М. Зорин, В.П. Цепелев, Т.С. Усманов // Нефтяное хозяйство. – 2019. – № 6. – С. 46–49. DOI: 10.24887/0028-2448-2019-6-46-49
3. Creating and maintenance of well's lift models at oil rim field's under-gas-cap zones – experience Novoport Oil and Gas-Condensate Field and Tazovskoe Oil and Gas-Condensate Field / R.T. Apasov, G.T. Apasov, A.I. Varavva, D.V. Vinogradov, F.I. Polkovnikov, D.V. Platonov, D.A. Samolovov // SPE Russian Petroleum Technology Conference. – Virtual, October 26–29, 2020. – Paper № SPE-201962-MS, 2020. – 13 p.
4. Obidike P., Onyekonwu M., Ubani C.E. Horizontal well standoff performance and exploitation of thin oil rim // SPE Nigeria Annual International Conference and Exhibition. – Lagos, Nigeria, August 5–7, 2019. – Paper № SPE-198725-MS, 2019. – 15 p.
5. Obidike P., Onyekonwu M., Ubani C.E. Exploitation of thin oil rim with large gas cap, a critical review // SPE Nigeria Annual International Conference and Exhibition. – Lagos, Nigeria, August 5–7, 2019. – Paper № SPE-198724-MS, 2019. – 12 p.
6. Reviving two offshore oil wells by coiled tubing gas lift system using the reservoir gas cap energy / M. Mhemed, N. Elrotob, A. Esladawi, M. Ben Abdalla, A. Sherik // SPE Kuwait Oil & Gas Show and Conference. – Mishref, Kuwait, October 13–16, 2019. – Paper № SPE-198017-MS, 2019. – 14 p.
7. Technology for oil production wells drawdown and for control for oil rim reservoir development on the Yurubcheno-Tokhonskoye Field / N. Dadakin, M. Nukhaev, K. Rymarenko, S. Grishenko, G. Aitkaliev, V. Kabanov, T. Gusachenko, A. Zaitsev // SPE Russian Petroleum Technology Conference. – Virtual, October 12–15, 2021. – Paper № SPE-206476-MS, 2021. – 12 p.
8. Gas cap injection as an associated gas utilisation method. Experience of Novoportovskoye Field / B.S. Janan, F.A. Koryakin, E.A. Sherstoboev, K.D. Isakov, V.I. Virt, D.Z. Kashapov // SPE Russian Petroleum Technology Conference. – Virtual, October 26–29, 2020. – Paper № SPE-201995-MS, 2020. – 15 p.
9. Kolbikov S.V. Peculiarities of thin oil rim development // SPE Russian Oil and Gas Exploration and Production Technical Conference and Exhibition. – Moscow, Russia, October 16–18, 2012. – Paper № SPE-160678-MS, 2012. – 11 p.

10. Kolbikov S.V. Case studies of gascondensate field with oil rim development: search for effective methods of oil production from thin rims // SPE Russian Petroleum Technology Conference. – Virtual, October 26–29, 2020. – Paper № SPE-201994-MS, 2020. – 14 p.
11. Feasibility of gas injection in gas cap for decline management of a mature offshore field / A. Thapliyal, S. Kundu, S. Chowdhury, D. Singh, H. Singh // SPE Oil and Gas India Conference and Exhibition. – Mumbai, India, 9–11 April 2019. – Paper № SPE-194570-MS. – P. 1–10.
12. Optimum well type for oil rim reservoirs with large gas-cap and strong aquifer / S. Ogiriki, G. Imonike, N. Ogolo, M. Onyekonwu // SPE Oil and Gas Nigeria Conference and Exhibition. – Lagos, Nigeria, 2018. – Paper № SPE-193411-MS.
13. Uwaga A.O., Lawal K.A. Concurrent gas-cap and oil-rim production: the swing gas option. SPE Nigeria Annual International Conference and Exhibition. – Abuja, Nigeria, 2006. – Paper № SPE-105985-MS.
14. Sharif A. Investigation of barrier water injection at gas-oil contact as co-development plan for gas cap reservoirs // Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference. – Abu Dhabi, UAE, November 12–15, 2018. – Paper № SPE-192655-MS, 2018. – 9 p.
15. Laboratory studies for design of a foam pilot for reducing gas channeling from gas cap in production well in Messoyakhskoye field / E. Saifullin, S. Zhanbosynova, D. Zharkov, C. Yuan, M. Varfolomeev, M. Zvada // SPE Journal. – 2022. – Vol. 25. – P. 472–485. DOI: 10.2118/206435-PA
16. Hofmann M., AL-Obaidi S.H., Chang W. Modelling the development of oil rim using water and gas injection // Journal of Geology & Geophysics. – 2022. – Vol. 11. – Iss. 4. – Paper № 10001028.
17. Жубанов А.Т., Тропин А.В., Черемисин Н.А. Влияние реликтовой нефтенасыщенности в газовой шапке нефтегазоконденсатных месторождений на уровне добычи углеводородов // Нефтяное хозяйство. – 2020. – № 1. – С. 50–54. DOI: 10.24887/0028-2448-2020-1-50-54
18. Азиз Х., Сеттари Э. Математическое моделирование пластовых систем. – М.; Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2004. – 416 с.
19. Федоров К.М., Самоловов Д.А., Полковников Ф.И. Анализ эффективности режимов разработки наклонных нефтяных оторочек // Российская нефтегазовая техническая конференция SPE. – М., 2018. – Статья № SPE-191486-18RPTC-RU. – 13 с. DOI: 10.2118/191486-18RPTC-RU
20. Правила подготовки технических проектов разработки месторождений углеводородного сырья. – М., Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации, 2019. – 155 с.
21. Методика подбора режима разработки нефтегазоконденсатной залежи с помощью гидродинамического моделирования / В.А. Кряжев, Я.А. Кряжев, А.Я. Гильманов, А.П. Шевелёв // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333. – № 9. – С. 137–147. DOI: 10.18799/24131830/2022/9/3579

Информация об авторах

Всеволод Александрович Кряжев, аспирант кафедры моделирования физических процессов и систем Физико-технического института Тюменского государственного университета, Россия, 625003, г. Тюмень, ул. Володарского, 6. kryazhev_seva@mail.ru

Ярослав Александрович Кряжев, аспирант кафедры моделирования физических процессов и систем Физико-технического института Тюменского государственного университета, Россия, 625003, г. Тюмень, ул. Володарского, 6. kryazhev_yar@mail.ru

Александр Янович Гильманов, кандидат физико-математических наук, старший преподаватель кафедры моделирования физических процессов и систем Физико-технического института Тюменского государственного университета, Россия, 625003, г. Тюмень, ул. Володарского, 6. a.y.gilmanov@utmn.ru

Александр Павлович Шевелёв, кандидат физико-математических наук, профессор кафедры моделирования физических процессов и систем Физико-технического института Тюменского государственного университета, Россия, 625003, г. Тюмень, ул. Володарского, 6. a.p.shevelev@utmn.ru

Поступила в редакцию: 28.11.2023

Поступила после рецензирования: 05.12.2024

Принята к публикации: 24.12.2024

REFERENCES

1. Smirnov D.S., Lanana O.V. Features of the development of the sub-gas zone and gas cap of the AB1-5 reservoir of the Samotlor field. *Exposition oil & gas*, 2018, no. 7 (67), pp. 24–27. (In Russ.)
2. Topal A.Yu., Firsov V.V., Zorin A.M., Cepelev V.P., Usmanov T.S. Features of the development of carbonate oil rims with the presence of extensive gas caps using barrier waterflooding of fields of Udmurtneft OJSC. *Oil Industry Journal*, 2019, no. 6, pp. 46–49. DOI: 10.24887/0028-2448-2019-6-46-49. (In Russ.)
3. Apasov R.T., Apasov G.T., Varavva A.I., Vinogradov D.V., Polkovnikov F.I., Platonov D.V., Samolovov D.A. Creating and maintenance of well's lift models at oil rim field's under-gas-cap zones – experience Novoport oil and gas-condensate field and Tazovskoe oil and gas-condensate field. *SPE Russian Petroleum Technology Conference*. Virtual, October 26–29, 2020. Paper № SPE-201962-MS, 2020. 13 p.
4. Obidike P., Onyekonwu M., Ubani C.E. Horizontal well standoff performance and exploitation of thin oil rim. *SPE Nigeria Annual International Conference and Exhibition*. Lagos, Nigeria, August 5–7, 2019. Paper № SPE-198725-MS, 2019. 15 p.

5. Obidike P., Onyekonwu M., Ubani C.E. Exploitation of thin oil rim with large gas cap, a critical review. *SPE Nigeria Annual International Conference and Exhibition*. Lagos, Nigeria, August 5–7, 2019. Paper № SPE-198724-MS, 2019. 12 p.
6. Mhemed M., Elrotob N., Esladawi A., Ben Abdalla M., Sherik A. Reviving two offshore oil wells by coiled tubing gas lift system using the reservoir gas cap energy. *SPE Kuwait Oil & Gas Show and Conference*. Mishref, Kuwait, October 13–16, 2019. Paper № SPE-198017-MS, 2019. 14 p.
7. Dadakin N., Nukhaev M., Rymarenko K., Grishenko S., Aitkaliev G., Kabanov V., Gusachenko T., Zaitsev A. Technology for oil production wells drawdown and for control for oil rim reservoir development on the Yurubcheno-Tokhonskoye field. *SPE Russian Petroleum Technology Conference*. Virtual, October 12–15, 2021. Paper № SPE-206476-MS, 2021. 12 p.
8. Janan B.S., Koryakin F.A., Sherstoboev E.A., Isakov K.D., Virt V.I., Kashapov D.Z. Gas cap injection as an associated gas utilisation method. experience of Novoportovskoye field. *SPE Russian Petroleum Technology Conference*. Virtual, October 26–29, 2020. Paper № SPE-201995-MS, 2020. 15 p.
9. Kolbikov S.V. Peculiarities of thin oil rim development. *SPE Russian Oil and Gas Exploration and Production Technical Conference and Exhibition*. Moscow, Russia, October 16–18, 2012. Paper № SPE-160678-MS, 2012. 11 p.
10. Kolbikov S.V. Case studies of gascondensate field with oil rim development: search for effective methods of oil production from thin rims. *SPE Russian Petroleum Technology Conference*. Virtual, October 26–29, 2020. Paper № SPE-201994-MS, 2020. 14 p.
11. Thapliyal A., Kundu S., Chowdhury S., Singh D., Singh H. Feasibility of gas injection in gas cap for decline management of a mature offshore field. *SPE Oil and Gas India Conference and Exhibition*. Mumbai, India, 2019. Paper No SPE-194570-MS. pp. 1–10.
12. Ogiriki S., Imonike G., Ogolo N., Onyekonwu M. Optimum well type for oil rim reservoirs with large gas-cap and strong aquifer. *SPE Oil and Gas Nigeria Conference and Exhibition*. Lagos, Nigeria, 2018. Paper № SPE-193411-MS.
13. Uwaga A.O., Lawal K.A. Concurrent gas-cap and oil-rim production: the swing gas option. *SPE Nigeria Annual International Conference and Exhibition*. Abuja, Nigeria, 2006. Paper № SPE-105985-MS.
14. Sharif A. Investigation of barrier water injection at gas-oil contact as co-development plan for gas cap reservoirs. *Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference*. Abu Dhabi, UAE, November 12–15, 2018. Paper № SPE-192655-MS, 2018. 9 p.
15. Saifullin E., Zhanbossynova S., Zharkov D., Yuan C., Varfolomeev M., Zvada M. Laboratory studies for design of a foam pilot for reducing gas channeling from gas cap in production well in Messoyakhskoye field. *SPE Journal*, 2022, vol. 25, pp. 472–485. DOI: 10.2118/206435-PA
16. Hofmann M., AL-Obaidi S.H., Chang W. Modelling the development of oil rim using water and gas injection. *Journal of Geology & Geophysics*, 2022, vol. 11, Iss. 4, Paper № 10001028.
17. Zhurbanov A.T., Tropin A.V., Cheremisin N.A. Influence of relict oil saturation in a gas cap of oil-gas-condensate fields on the rate of hydrocarbon production. *Oil Industry Journal*, 2020, no. 1, pp. 50–54. (In Russ.) DOI: 10.24887/0028-2448-2020-1-50-54
18. Aziz H., Settari A. *Petroleum reservoir simulation*. London, Applied Science Publishers Ltd., 1979. 476 p.
19. Fedorov K.M., Samolovov D.A., Polkovnikov F.I. Recovery drive analysis in respect of tilted oil rims. *SPE Russian petroleum conference*. Moscow, Russia, October 15–17, 2018. Paper № SPE-191486-18RPTC-MS, 11 p. DOI: 10.2118/191486-18RPTC-ms
20. *Rules for the preparation of technical projects for the development of hydrocarbon reservoirs*. Moscow, Ministry of Natural Resources of Russia Publ., 2019. 155 p. (In Russ.)
21. Kryazhev V.A., Kryazhev Ya.A., Gilmanov A.Ya., Shevelev A.P. Methodology for selecting the development mode for oil and gas condensate deposits using hydrodynamic modeling. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, no. 9, pp. 137–147. (In Russ.) DOI: 10.18799/24131830/2022/9/3579.

Information about the authors

Vsevolod A. Kriazhev, Postgraduate Student, University of Tyumen, 6, Volodarsky street, Tyumen, 625003, Russian Federation. kryazhev_seva@mail.ru

Yaroslav A. Kriazhev, Postgraduate Student, University of Tyumen, 6, Volodarsky street, Tyumen, 625003, Russian Federation. kryazhev_yar@mail.ru

Aleksandr Ya. Gilmanov, Cand. Sc., Senior Lecturer, University of Tyumen, 6, Volodarsky street, Tyumen, 625003, Russian Federation. a.y.gilmanov@utmn.ru

Aleksandr P. Shevelev, Cand. Sc., Professor, University of Tyumen, 6, Volodarsky street, Tyumen, 625003, Russian Federation. a.p.shevelev@utmn.ru

Received: 28.11.2023

Revised: 05.12.2024

Accepted: 24.12.2024

УДК 622.322
DOI: 10.18799/24131830/2025/2/4643
Шифр специальности ВАК: 2.5.21

Повышение эффективности извлечения пластовой жидкости из сильноглинистых пластов путем воздействия на ее структуру электрическим полем

М.Я. Хабибуллин✉

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

✉ m-hab@mail.ru

Аннотация. *Актуальность* исследования обусловлена необходимостью оценки влияния постоянного и переменного электрического поля на физико-химические свойства различного типа вод, на объемную скорость фильтрации жидкостей из сильноглинистых пористых сред и на коэффициент вытеснения нефти водой. *Цель:* исследование влияния постоянного и знакопеременного электрического поля на водородный показатель и межфазное натяжение водных электролитов различной природы, а также на проницаемость пористой среды и коэффициент вытеснения нефти в условиях, моделирующих упомянутый выше пласт кирмакинской свиты. *Объекты.* Эксперименты проводились на специально сконструированной установке, позволяющей производить измерения как в постоянном, так и в переменном электрическом поле, с учетом перепада давления. Корпус модели пласта был изготовлен из органического стекла в виде трубки с варьируемой длиной 0,3–0,7 м и диаметром 0,025 м с смонтированными на входе и выходе электродами из нержавеющей стали. Исследования посвящены влиянию постоянного и знакопеременного электрического поля на водородный показатель и межфазное натяжение водных электролитов различной природы, а также на проницаемость пористой среды и коэффициент вытеснения нефти в условиях, моделирующих упомянутый выше пористый пласт кирмакинской свиты. *Методы.* Наличие внешнего электрического поля оказывает существенное влияние на результирующее значение водородного показателя (рН) и величину межфазного натяжения водных электролитов на границе с углеводородной фазой, чем способствует, по аналогии с реагентной обработкой нефтяных коллекторов, увеличению их проницаемости. При исследовании процессов вторичной миграции нефти в низкопроницаемых водонасыщенных коллекторах отмечается практическое отсутствие факторов напорной фильтрации и подчеркивается доминирование диффузионно-осмотического и электрокинетического факторов при их протекании. Наличие электроосмотического передвижения нефти в различных дисперсных породах (песчано-алевритах и глинах) под действием внешнего электрического поля было доказано экспериментально, а возможность вытеснения нефти фронтом водного раствора электролитов через пористые мембраны различной капиллярно-пористой природы обсуждалась в работе. *Результаты.* На основании совокупности приведенных результатов можно прийти к важному с практической точки зрения выводу: путем направленного воздействия внешнего электрического поля с регламентированными параметрами напряженности на вторичный процесс извлечения нефти водными электролитами можно существенно увеличить значение коэффициента вытеснения труднопроницаемых коллекторов, в частности высокоглинистых коллекторов кирмакинской свиты.

Ключевые слова: коэффициент вытеснения, скорость фильтрации, электрическое поле, сильноглинистые пористые среды, физико-химические свойства, электроосмотическое давление, водородный показатель

Для цитирования: Хабибуллин М.Я. Повышение эффективности извлечения пластовой жидкости из сильноглинистых пластов путем воздействия на ее структуру электрическим полем // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 2. – С. 92–101. DOI: 10.18799/24131830/2025/2/4643

UDC 622.322

DOI: 10.18799/24131830/2025/2/4643

Increasing the efficiency of formation fluid extraction from highly clayey formations by affecting its structure with an electric field

M.Ya. Khabibullin✉

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

✉m-hab@mail.ru

Abstract. Relevance. The need to evaluate the impact of a constant and alternating electric field on the physicochemical properties of various types of water, on the volumetric rate of filtration of liquids from highly clayey porous media and on the coefficient of oil displacement by water. **Aim.** To study the impact of a constant and alternating electric field on the hydrogen index and interfacial tension of aqueous electrolytes of various natures, as well as on porous medium permeability and the oil displacement coefficient under conditions simulating the above-mentioned formation of the Kirmakinsky formation. **Objects.** The experiments were carried out on a specially designed installation that allows measurements in both constant and alternating electric fields, taking into account the pressure drop. The body of the reservoir model was made of organic glass in the form of a tube with a variable length of 0.3–0.7 m and a diameter of 0.025 m with stainless steel electrodes mounted at the inlet and outlet. The research is devoted to the impact of constant and alternating electric fields on the hydrogen index and interfacial tension of aqueous electrolytes of various natures, as well as on the permeability of the porous medium and the oil displacement coefficient under conditions simulating the above-mentioned porous layer of the Kirmakinsky formation. **Methods.** The presence of an external electric field has a significant impact on the resulting value of the pH value and the value of the interfacial tension of aqueous electrolytes at the boundary with the hydrocarbon phase, which contributes, by analogy with the reagent treatment of oil reservoirs, to an increase in their permeability. When studying the processes of secondary oil migration in low-permeability water-saturated reservoirs, the practical absence of pressure filtration factors is noted and the dominance of diffusion-osmotic and electrokinetic factors during their occurrence is emphasized. The presence of electroosmotic movement of oil in various dispersed rocks (sand-silts and clays) under the effect of an external electric field was proven experimentally, and the possibility of displacing oil by the front of an aqueous solution of electrolytes through porous membranes of various capillary-porous nature was discussed in the work. **Results.** Based on the totality of the presented results, it is possible to come to an important conclusion from a practical point of view: by means of the directed action of an external electric field with regulated intensity parameters on the secondary process of oil extraction by aqueous electrolytes, it is possible to significantly increase the value of the displacement coefficient of difficult-to-permeate reservoirs, in particular high-clay reservoirs of the Kirmakinsky formation.

Keywords: displacement coefficient, filtration rate, electric field, highly clayey porous media, physicochemical properties, electroosmotic pressure, pH value

For citation: Khabibullin M.Ya. Increasing the efficiency of formation fluid extraction from highly clayey formations by affecting its structure with an electric field. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 2, pp. 92–101. DOI: 10.18799/24131830/2025/2/4643

Введение

Как известно, современный этап развития нефтяной промышленности характеризуется осложнениями, связанными как с существующей диспропорцией между подготовкой запасов нефти и их извлечением, так и с увеличением доли трудноизвлекаемых запасов (ТИЗ). Подавляющая часть таких месторождений, находящихся на поздней стадии разработки, приурочена к коллекторам низкой проницаемости, характеризующимся сложным строением продуктивных пластов, значительными размерами водонефтяных зон и повышенной вязкостью нефти [1, 2].

К подобной категории пластов относится и кирмакинская свита (КС) – один из основных объектов

разработки продуктивной толщи Абшеронского полуострова, содержащая большие запасы неизвлеченной нефти. Так, несмотря на завершение буровых работ, все горизонты КС характеризуются низким коэффициентом извлечения нефтяных запасов, не превышающим 30 % [3].

С целью интенсификации добычи нефти на упомянутых залежах начиная еще с 1945 г. были осуществлены попытки применения традиционных технологий гидро- и газодинамического воздействия на пласт, которые оказывались малоэффективными по причине низкой проницаемости неоднородных по составу продуктивных коллекторов, содержащих высокодисперсные глинистые породы [4–6].

Методы и материалы

К настоящему времени в ряде работ, посвященных исследованию так называемых процессов вторичной миграции нефти в низкопроницаемых водонасыщенных коллекторах, отмечается практическое отсутствие факторов напорной фильтрации и подчеркивается доминирование диффузионно-осмотического и электрокинетического факторов при их протекании. Наличие электроосмотического передвижения нефти в различных дисперсных породах (песчано-алевритах и глинах) под действием внешнего электрического поля было доказано экспериментально, а возможность вытеснения нефти фронтом водного раствора электролитов через пористые мембраны различной капиллярно-пористой природы обсуждалась в работах [7, 8]. Влияние на фильтрацию флюидов преобладания электроосмотического давления над гидродинамическим при протекании электрического тока в пластовой системе отмечалось также и в работах [9, 10].

Известно, что зависимость численных значений фильтрационного потенциала (потенциала течения), возникающего при воздействии естественных электрических полей в водонасыщенных коллекторах нефти, и скорости электроосмоса от параметров поля, свойств пористой и жидкой сред описывается уравнением Гельмгольца–Смолуховского, которое может быть представлено в виде [11] по формулам (1) и (2):

$$\Delta U_T = \frac{\zeta \varepsilon \Delta P}{4\pi \eta \kappa} \quad (1)$$

и

$$v = \frac{S \zeta \varepsilon h}{4\pi \eta}, \quad (2)$$

где ζ – электрокинетический потенциал, В; ε – диэлектрическая проницаемость жидкой фазы, для водной среды равная 81 (безразмерная величина); ΔP – гидравлическое давление (напор) жидкости, м; η – вязкость поровой жидкости, для водных сред составляет 0,001 Н·с/м²; κ – электропроводность поровой жидкости, электрическая константа (диэлектрическая проницаемость вакуума), равная $8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м; S – суммарная площадь поперечного сечения капиллярных каналов пористой среды, м²; $h = E/L$ – градиент электрокинетического потенциала (напряженность электрического поля), В/м; E – потенциал, приложенный к пористой среде длиной L (м), В.

Как видно из уравнений, в параметрическую зависимость процесса переноса жидкости в пористой среде под действием электрического поля привнесены как характеристики самого поля, так и молекулярные свойства фильтрующей среды и поровой жидкости [12].

Следует отметить, что наличие внешнего электрического поля оказывает существенное влияние на результирующие значения водородного показателя (рН) и величину межфазного натяжения водных электролитов на границе с углеводородной фазой, чем способствует, по аналогии с реагентной обработкой нефтяных коллекторов, увеличению их проницаемости [13].

Отсутствие универсальности перечисленных характеристик (нет критериальной связи для данной зависимости в безразмерных параметрах) обуславливает необходимость постановки задач их экспериментального исследования применительно к конкретной системе порода–нефть–вода и условиям их взаимодействия [14].

Данная работа посвящена исследованию влияния постоянного и знакопеременного электрического поля на водородный показатель и межфазное натяжение водных электролитов различной природы, а также на проницаемость пористой среды и коэффициент вытеснения нефти в условиях, моделирующих упомянутый выше пористый пласт кирмакинской свиты.

Результаты и обсуждения

Эксперименты проводились на специально сконструированной установке, позволяющей производить измерения как в постоянном, так и в переменном электрическом поле, с учетом перепада давления [15–17]. Корпус модели пласта был изготовлен из органического стекла в виде трубки длиной 0,3–0,7 м и диаметром 0,025 м с вмонтированными на входе и выходе электродами из нержавеющей стали. Пористая среда составлялась из породы поверхностных обнажений Кирмакинской долины месторождения Балаханы [18–20]. В качестве вытесняющих нефть гидродинамических компонентов системы использовались водные электролиты, характеристика которых представлена в табл. 1.

Таблица 1. Характеристика нагнетаемых в пластовую модель водных электролитов

Table 1. Characteristics of aqueous electrolytes injected into the reservoir model

Вода Water	Состав, мг. экв./л./Composition, mg. eq./l							
	Na ⁺ +K ⁺	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Cl ⁻	SO ₄ ⁻	HCO ₃ ⁻	CO ₃ ⁻	RCO ₃
Курильская Kurinskaya	36,04	5,8	3,1	40,0	5,1	—	0,07	—
Морская Marine	154,0	16,0	56,0	166,0	58,0	2,0	—	—
Жесткая пластовая Tough reservoir	171,90	16,54	15,28	202,33	0,06	0,92	—	0,39
Щелочная пластовая Alkaline reservoir	24,17	0,50	1,30	15,19	2,97	7,31	0,56	0,67

Перед постановкой базовых экспериментов было изучено влияние постоянного электрического поля на значения pH и межфазное натяжение (σ) использованных водных электролитов на границе раздела с высокоочищенным керосином, что сопоставлялось с предварительно полученными результатами его оценки вне воздействия электрического поля [21–24].

Как вытекает из данных, приведенных на рис. 1, а, при фиксированных значениях напряжения электрического поля (20 и 100 В) с увеличением времени течения постоянного тока через образец щелочной воды наблюдается прирост величины водородного показателя различной интенсивности, зависящей от напряжения на электродах, который стабилизируется в течение 30 минут от начала эксперимента. Так, при напряжении 20 В после 30 мин. эксперимента прирост водородного показателя щелочной воды составляет 14,3 %, а величина межфазного натяжения между ней и очищенным керосином снижается на 22,2 % по отношению к таковой до воздействия электрического поля. Расход электроэнергии при этом составил $1,2 \cdot 10^{-4}$ кВт·ч, что незначительно превышает энергозатраты в случае экспериментов с пластовой, жесткой и Куринской водой [25].

Аналогичная тенденция прироста водородного показателя и снижения поверхностного натяжения на границе раздела электролит–углеводород наблюдается исключительно при воздействии на морскую воду электрического поля напряженностью 20 В (рис. 1, б) [26–29]. При воздействии поля напряженностью 100 В водородный потенциал электролита возрастает, а поверхностное натяжение снижается только в начальном периоде протекания постоянного тока (~5 мин.). С увеличением времени воздействия электрического поля наблюдается резкое снижение значения pH до величины 8,3, меньшей водородного показателя, не подверженного воздействию поля образца морской воды. Как следствие этого, в области экстремальных значений основности электролита поверхностное натяжение на границе раздела с очищенным керосином минимально [30–33].

Взаимосвязь значений водородного показателя водных электролитов и поверхностного натяжения на границе раздела с углеводородными жидкостями прослеживается также в экспериментах по воздействию электрического поля различной напряженности на морскую воду (рис. 2) [34]. При этом установлено, что на результирующее значение pH электролита оказывают влияние как варьируемые параметры напряженности электрического поля, так и начальное приращение величины водородного показателя в процессе ионного обмена при контакте морской воды с пористой средой [35–39]. Так, в результате фильтрации морской воды через

сильноглинистую пористую среду и последующего воздействия внешнего электрического поля напряженностью 25, 50, 75 и 100 В наблюдается увеличение pH электролита с 8,5 до 12,5 и, как следствие этого, снижение межфазного натяжения воды с 28 до 7 мН/м. Расход электроэнергии для достижения этих показателей составил $78 \cdot 10^{-4}$ кВт·ч.

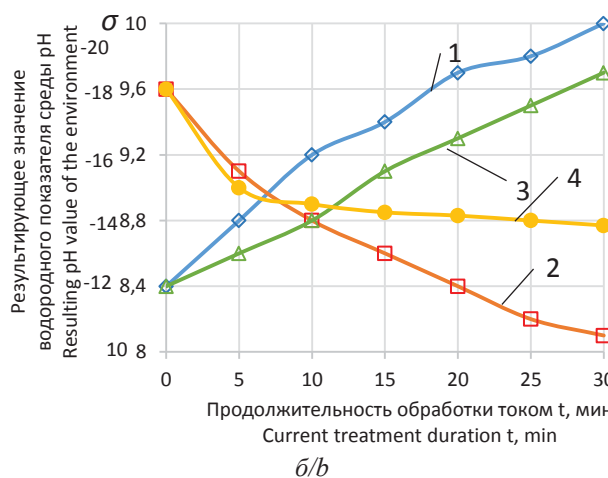
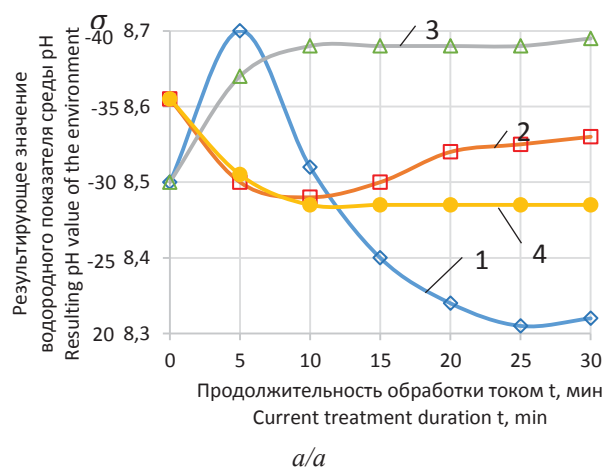


Рис. 1. Зависимость изменения величины pH и σ от продолжительности обработки током пластово-щелочной (а) и морской (б) вод. Величины pH и σ при напряжениях 100 В (1,2) и 20 В (3,4)

Fig. 1. Dependence of changes in pH and σ on the duration of current treatment of alkaline reservoir (a) and marine (b) water. pH and σ values at voltages of 100 V (1,2) and 20 V (3,4)

Для расширения представлений о влиянии природы водных электролитов в процессе их фильтрации на степень активации во внешнем электрическом поле были проведены эксперименты по оценке скорости фильтрации смесей пластовой щелочной и пресной воды. Пористая среда при этом составлялась из выборки сильноглинистой породы кирмакинской свиты [40–42].

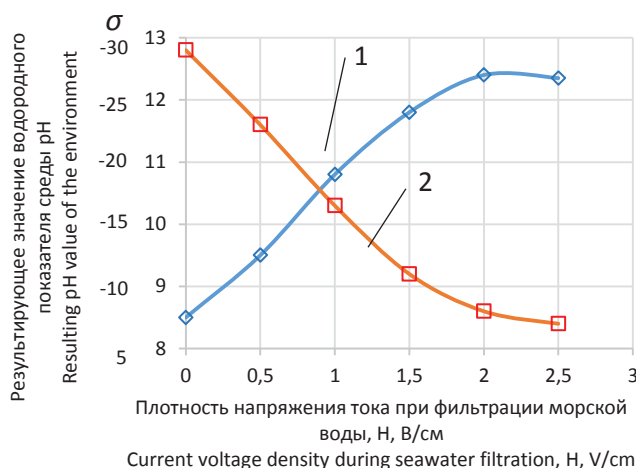
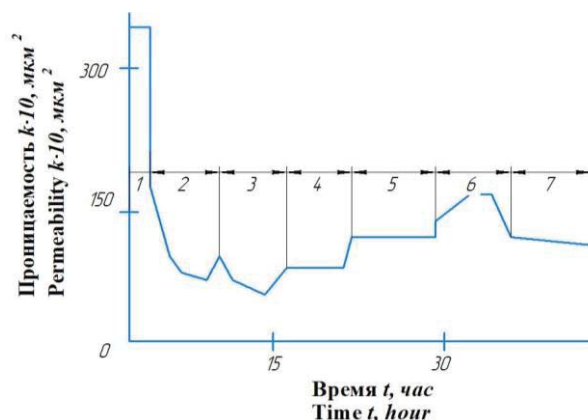


Рис. 2. Зависимость изменения величины pH (1) и σ (2) от плотности напряжения тока при фильтрации морской воды

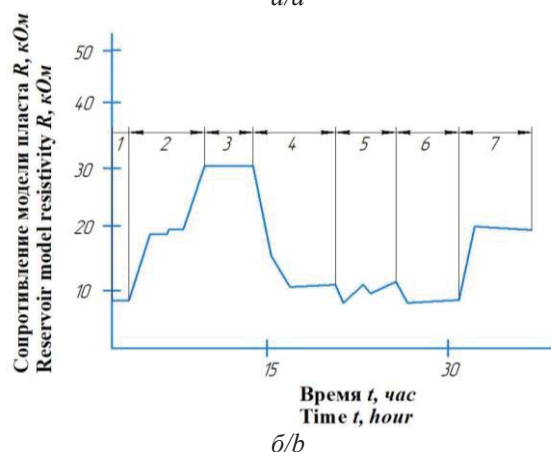
Fig. 2. Dependence of changes in pH (1) and σ (2) on current voltage density during marine water filtration

С этой целью после достижения постоянной величины проницаемости пористой среды ($0,33 \text{ мкм}^2$) при фильтрации пластовой щелочной воды под гидродинамическим перепадом давления $0,04 \text{ МПа}$ последняя замещалась пресной, Куринской. Как и следовало ожидать, при нагнетании пресной воды происходит резкое снижение проницаемости пористой среды (рис. 3, а), что, вероятно, связано с перераспределением равновесного состояния неорганических ионов при смешении электролитов и с изменением параметров так называемого двойного электрического слоя на границе раздела порода-жидкость [43–45]. Примечательным является тот факт, что последовательное воздействие постоянно-го тока с напряжением 100 В и переменного тока с напряжением $100, 150$ и 200 В на модель пласта кирмакинской свиты, характеризующегося неоднородностью минералогического состава, приводит к релаксации высокой фильтрационной способности смешанного электролита [46]. Учитывая, что скорость протекания электрокинетических процессов обратно пропорциональна сопротивлению токопроводящей среды, представлялось целесообразным исследование зависимости электрического сопротивления системы пористая среда – электролит от параметров прилагаемого электрического поля. Как видно из рис. 3, а, б, водопроницаемость пористой среды антибатна величине электрического сопротивления системы в целом и пропорциональна силе тока, проходящего через модель пласта. Следовательно, в случае реализации однонаправленного потока зарядов и водной фазы за счет одновременного воздействия перепада давления и внешнего электрополя возможен синергизм этих двух составляющих, проявляющийся в возрастании фильтрационных

свойств. Полученные результаты свидетельствуют также о возможности избирательно регулировать фильтрационную способность системы за счет варьирования природы электролита и параметров прилагаемого электрического поля [47–49].



а/а



б/б

Рис. 3. Изменение проницаемости (а) и сопротивления модели пласта (б) в различных условиях. Фильтрация пластовой (1) и Куринской воды (2, 7) без воздействия тока; Куринской воды при напряжении постоянного тока 100 В (3), при напряжениях переменного тока 100 В (4), 150 В (5) и 200 В (6)

Fig. 3. Changes in permeability (а) and resistance of the reservoir model (б) under different conditions. Filtration of formation (1) and Kurinskaya water (2, 7) without exposure to current; Kurinskaya water at a DC voltage of 100 V (3), at AC voltages of 100 V (4), 150 V (5) and 200 V (6)

Естественно предположить, что влияние электрического поля на фильтрационные характеристики исследуемой модельной системы пористая среда – водный электролит может распространяться и на показатели вытеснения нефти из порового пространства пласта. Для экспериментальной проверки этого предположения была реализована модель пласта, составленная из песка кирмакинской

свиты с практически идентичной пористостью (26...27 %), проницаемостью ($0,3 \text{ мкм}^2$) и удельной поверхностью ($17 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{м}^3$). Емкость с породой подвергалась вакуумной обработке и насыщалась пластовой щелочной водой горизонта кирмакинской свиты. После замещения воды нефтью одноименного месторождения нефтенасыщенность породы составляла 73,5 % [50, 51].

На рис. 4 представлены результаты исследования зависимости коэффициента вытеснения нефти от пропущенного объема морской воды при одинаковом перепаде давления (0,1 МПа) как в отсутствии, так и при наличии воздействия постоянного электрического тока. Видно, что для безводной части фильтрата значение коэффициента вытеснения равно 0,37. При протокe через модель морской воды в количестве, равном четырехкратному объему порового пространства (так называемый водный период фильтрации) усредненное значение коэффициента вытеснения нефти составило 0,27, что в совокупности с безводным периодом фильтрации достигает практически приемлемой величины – 0,64 [52].

После появления в фильтрате воды модель пласта с определенным временным интервалом подвергалась воздействию постоянного, а затем переменного тока с напряжением 100 В. Сопоставление результатов, иллюстрируемых кривыми 1 и 2 (рис. 4), свидетельствует о более интенсивном росте значений коэффициента вытеснения нефти морской водой под воздействием электрического поля в начальной стадии процесса фильтрации. Дальнейшая закачка воды не приводит к ощутимому приращению величины коэффициента вытеснения нефти, который принимает стационарное значение после закачки воды в количестве, равном трехкратному объему порового пространства модели пласта [53–55].

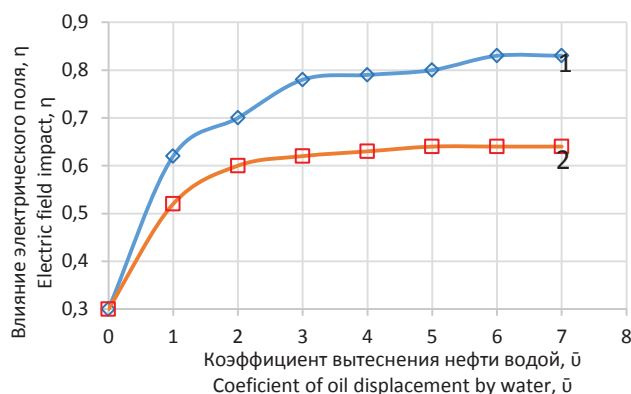


Рис. 4. Влияние электрического поля на коэффициент вытеснения нефти водой: 1 – вытеснение морской водой при напряжении тока 100 В; 2 – вытеснение морской водой

Fig. 4. Electric field impact on the coefficient of oil displacement by water: 1 – displacement by marine water at a voltage of 100 V; 2 – displacement by marine water

Заключение

Таким образом, на основании совокупности приведенных результатов можно прийти к важному с практической точки зрения заключению, а именно: когда традиционные методы извлечения нефти из низкопродуктивных пластов оказываются малоэффективными, путем направленного воздействия внешнего электрического поля с регламентированными параметрами напряженности на вторичный процесс извлечения нефти водными электролитами можно существенно увеличить значение коэффициента вытеснения труднопроницаемых коллекторов, в частности высокоглинистых коллекторов кирмакинской свиты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Alleman D., Qi Qu, Keck R. The development and successful field use of viscoelastic surfactant-based diverting agents for acid stimulation, Texas // International Journal of Oilfield Chemistry. – 2020. – Vol. 01. – P. 45–48.
- Ахмад Ф.Ф., Гайбалиев Г.Г. Интенсификации притока нефти путём изоляции притоков воды в призабойной зоне // Scientific Petroleum. – 2022. – № 2. – С. 23–27.
- Лятифов Я.А. Нестационарное воздействие термоактивной полимерной композицией для глубинного выравнивания профиля фильтрации // Scientific Petroleum. – 2021. – № 1. – С. 25–30.
- Senashov S.I., Savostyanova I.L., Cherepanova O.N. Numerical-and-analytic method for solving Cauchy problem of one-dimensional gas dynamics // Journal of Siberian federal university. mathematics and physics. – 2022. – Vol. 15 (4). – P. 444–449. DOI: 10.17516/1997-1397-2022-15-4-444-449.
- Хабибуллин М.Я. Исследование процессов, происходящих в колонне труб при устьевой импульсной закачке жидкости в скважину // Нефтегазовое дело. – 2018. – Т. 16. – № 6. – С. 34–39. DOI: 10.17122/ngdelo-2018-6-34-39.
- A probabilistic assessment of the casing integrity in a Pre-salt wellbore / P.A.L.P. Firme, F.L.G. Pereira, D. Roehl, C. Romanel // 50th US Rock Mechanics Geomechanics Symposium. – USA, Houston, 2016. – Vol. 3. – P. 2555–2564.
- Aregbe A.G. Wellbore stability problems in deepwater gas wells // World Journal of Engineering and Technology. – 2017. – Vol. 05. – № 04. – P. 626–647.
- Zhang J., Lu Y. Study on temperature distribution of ultra-deep wellbore and its effect on mechanical properties of surrounding rock // Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering. – 2019. – Vol. 38. – P. 2831–2839.
- Manshad A., Jalalifar H., Aslannejad M. Analysis of vertical, horizontal and deviated wellbores stability by analytical and numerical methods // Journal of Petroleum Exploration and Production Technology. – 2014. – Vol. 4. – P. 359–369.
- Хабибуллин М.Я., Сулейманов Р.И. Повышение надежности сварных соединений трубопроводов в системе поддержания пластового давления // Нефтегазовое дело. – 2019. – Т. 17. – № 5. – С. 93–98. DOI: 10.17122/ngdelo-2019-5-93-98

11. Рогов Е.А. Исследование проницаемости призабойной зоны скважин при воздействии технологическими жидкостями // Записки Горного института. – 2020. – Т. 242. – С. 169–173. DOI: 10.31897/PMI.2020.2.169
12. Zaichenko A.Yu., Glazov S.V., Salgansky E.A. Filtration combustion of viscous hydrocarbon liquids // Theoretical foundations of chemical engineering. – 2017. – Vol. 51. – № 5. – P. 673–679.
13. The application of X-ray Micro Computed Tomography (MicroCT) of core sample for estimation of physicochemical treatment efficiency / M.S. Orlov, P.V. Roschin, I.A. Struchkov, V.T. Litvin // SPE Russian Petroleum Technology Conference. – Moscow, Russia, 2015. SPE-176600-MS. DOI: 10.2118/176600-MS.
14. Assem A.I., Nasr-El-Din H.A., De Wolf C.A. Formation damage due to iron precipitation in carbonate rocks // SPE European Formation Damage Conference & Exhibition. – 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.2118/165203-MS>
15. Lian Zhanghua, Luo Zeli, Yu Hao. Assessing the strength of casing pipes that contain corrosion pit defects // Journal of Southwest Petroleum University. – 2018. – Vol. 40. – № 2. – P. 86–94.
16. Хабибуллин М.Я. Совершенствование процесса солянокислотной обработки скважин применением новейших технологий и оборудования // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 10. – С. 128–134. DOI: 10.18799/24131830/2020/10/2861
17. Хэнян Ван, Подгорнов В.М. Проектирование мест расположения термокомпенсаторов для предотвращения деформации многослойных фильтров в горизонтальном стволе паронагнетательной скважины // Газовая Промышленность. – 2019. – № 4. – С. 38–44.
18. Кашников Ю.А., Ашихмин С.Г., Кухтинский А.Э. О связи коэффициентов трещиностойкости и геофизических характеристик горных пород месторождений углеводородов // Записки Горного института. – 2020. – Т. 241. – С. 83–90. DOI: 10.31897/PMI.2020.1.83.
19. Шахвердиев А.Х., Арефьев С.В. Прогноз прорыва воды при заводнении в условиях неустойчивости фронта вытеснения нефти водой // SOCAR Proceedings. – 2023. – № 3. – С. 58–67. DOI: 10.5510/OGP20230300887
20. Some features of quaternary ammonium compounds as a corrosion inhibitor in environments with sulfate-reducing bacteria / U.S. Nazarov, N.S. Salidjanova, Sh.M. Nashvandov, O.L. Xidirov // Scientific Petroleum. – 2022. – Vol. 1. – P. 52–62.
21. Хабибуллин М.Я. Увеличение эффективности разделения жидких систем при сборе пластовой жидкости // Нефтегазовое дело. – 2020. – Т. 18. – № 2. – С. 64–71. DOI: 10.17122/ngdelo-2020-2-64-71.
22. Шахвердиев А.Х., Арефьев С.В. Концепция мониторинга и оптимизации процесса заводнения нефтяных пластов при неустойчивости фронта вытеснения // Нефтяное хозяйство. – 2021. – № 11. – С. 104–109.
23. Двойников М.В., Ошибков А.В. Анализ проектных решений и технологических приемов проектирования и реализации профилей наклонно-направленных и горизонтальных скважин // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2013. – № 4. – С. 40–43.
24. Кейн С.А., Шве́ц С.В. Оценка сложности траектории горизонтальных скважин при спуске обсадных колонн // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2015. – № 7. – С. 38–41.
25. Khabibullin M.Ya., Suleimanov R.I. Automatic packer reliability prediction under pulsed transient flooding of hydrocarbon reservoirs // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – Novosibirsk, 2019. – P. 012024. DOI: 10.1088/1757-899X/560/1/012024.
26. Case history of a challenging thin oil column Extended Reach Drilling (ERD) development at Sakhalin / V.P. Gupta, S.R. Sanford, R.S. Mathis, E.K. Dipippo, M.J. Egan // Paper SPE/IADC. – 2013. – Vol. 12. – P. 163487.
27. Helmy M.W. Application of new technology in the completion of ERD wells // Sakhalin-1 Development. Paper SPE. – 2006. – Vol. 8. – P. 103587.
28. Suleimanov R.I., Khabibullin M.Ya., Suleimanov Re.I. Analysis of the reliability of the power cable of an electric-centrifugal pump unit // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. International Conference on Innovations and Prospects of Development of Mining Machinery and Electrical Engineering 2019. – 2019. – P. 012054. DOI: 10.1088/1755-1315/378/1/012054
29. Hossain M.E., AlMejed A.A. Fundamental of sustainable drilling engineering. – Chichester: Scrivener Publ. LLC, 2015. – 786 p.
30. Шве́ц С.В., Кейн С.А. Влияние параметров траектории горизонтальной скважины на спуск обсадной колонны // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2014. – № 7. – С. 19–23.
31. Successful optimization strategies combine to deliver significant performance boost at the edge of the ERD envelope / R.W. James, P.J. Pastusek, G.R. Kuhn, A.F. Andreev, J.R. Bailey, L.W. Wang // Sakhalin Island. Russia. Paper SPE. San Diego. – 2012. – Vol. 9. – P. 150959.
32. Khabibullin M.Ya. Managing the processes accompanying fluid motion inside oil field converging-diverging pipes // Journal of Physics: Conference Series. International Conference «Information Technologies in Business and Industry». – 2019. – P. 042012. DOI: 10.1088/1742-6596/1333/4/042012
33. New rotary shouldered connection expands the capability of world record ERD operation / S.R. Sanford, M.W. Walker, J.N. Brock, M.J. Jellison, A.F. Muradov // Paper SPE/ IADC. Fort Worth. – 2014. – Vol. 5. – P. 168049.
34. Schamp J.H., Estes B.L., Keller S.R. Torque reduction techniques in ERD wells // Paper SPE/IADC. Miami. – 2006. – Vol. 14. – P. 98969.
35. Третьяк А.А., Савенок О.В., Шве́ц В.В. Скважинные фильтры. – Новочеркасск: Колорит, 2019. – 227 с.
36. Successful implementation of hydraulic fracturing techniques in high permeability heavy oil wells in the Llanos Basin-Colombia / J.I. Bahamon, C.E. Garcia, M.J. Ulloa, J.H. Leal // Ecopetrol SPE. Weatherford. – 2015. – Vol. 54. – P. 136425.
37. Galimullin M.L., Khabibullin M.Ya. Experience with sucker-rod plunger pumps and the latest technology for repair of such pumps // Chemical and Petroleum Engineering. – 2020. – Vol. 55. – № 11–12. – P. 896–901. DOI: 10.1007/s10556-020-00710-1
38. Щербакова К.О. Анализ проблемы высокой обводненности добываемой продукции горизонтальных скважин // Proceedings of Higher Educational Establishments: Geology and Exploration. – 2022. – № 6. – С. 29–38. DOI: <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2022-64-6-29-38>.

39. Dennar L., Amro M., Reichmann S. Polymer selection for enhanced oil recovery in a Niger-Delta Formation via laboratory experiments // SPE Nigeria Annual International Conference and Exhibition. – 2022. – SPE-211928-MS. DOI: <https://doi.org/10.2118/211928-MS>
40. Khabibullin M.Ya. Theoretical grounding and controlling optimal parameters for water flooding tests in field pipelines // Journal of Physics: Conference Series. International Conference «Information Technologies in Business and Industry». – 2019. – P. 042013. DOI: 10.1088/1742-6596/1333/4/042013
41. Шве́ц С.В., Кейн С.А. Перспективы применения метода спуска обсадных колонн с облегчённым нижним участком // Электронный научный журнал «Ресурсы Европейского Севера. Технологии и экономика освоения». – 2015. – № 2. – С. 81–90.
42. Хабибуллин М.Я. Метод термокислотного импульсирования для увеличения нефтеотдачи // Нефтегазовое дело. – 2020. – Т. 18. – № 4. – С. 58–64. DOI: 10.17122/ngdelo-2020-4-58-64.
43. Karim A., Du C., Hansson G. Influence of exposure to 980 nm laser radiation on the luminescence of Si: Er/O light-emitting diodes // Journal of applied physics. – 2008. – Vol. 12. – P. 123110. DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.3050316>
44. The next generation of Sakhalin extended-reach drilling / R.I. Viktorin, J.K. McDermott, R.C. Rush, J.L. Schamp // Paper SPE/IADC. Miami. – 2006. – Vol. 3. – P. 99131.
45. Khabibullin M.Ya. Managing the reliability of the tubing string in impulse non-stationary flooding // Journal of Physics: Conference Series. International Conference «Information Technologies in Business and Industry». 4 – Mechatronics, Robotics and Electrical Drives. – 2019. – P. 052012. DOI: 10.1088/1742-6596/1333/5/052012
46. Walker M.W. Pushing the extended reach envelope at Sakhalin: an operator's experience drilling a record reach well // Paper SPE/IADC. San Diego. – 2012. – Vol. 9. – P. 151046.
47. Walker M.W., Veselka A., Harris S.A. Increasing Sakhalin extended reach drilling and completion capability // Paper SPE/IADC. Amsterdam. – 2009. – Vol. 4. – P. 119373.
48. CFD simulation study of shelf and tube heat exchangers with different baffle segment configurations / A.S. Ambekar, R.H. Sivakumar, N.A. Anantharaman, M.D. Vivekenandan // Applied Thermal Engineering. – 2016. – Vol. 108. – P. 999–1007.
49. Mechanical degradation of biopolymers for enhanced oil recovery applications / V.H. Ferreira, K.J. Clinckspoor, A.B. Vermelho, V. S. Cardoso // SPE Journal. – 2022. – Vol. 27 (04). – P. 2052–2072. <https://doi.org/10.2118/209579-PA>.
50. Zhangaliyev M.M., Hashmet M.R., Pourafshary P. Laboratory investigation of hybrid nano-assisted-polymer method for EOR applications in carbonate reservoirs // Offshore Technology Conference Asia, OTC-31398-MS. – 2022. DOI: <https://doi.org/10.4043/31398-MS>.
51. Ван Хэнян, Подгорнов В.М., Мо Цзяли. Экспериментальные исследования эффективности фильтрующих элементов забойных фильтров в потоке высоковязкой нефти // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2022. – № 01. – С. 43–47.
52. Fluid flow with compaction and sand production in unconsolidated sandstone reservoir / Y.A. Xiong, H.J. Xu, Y.D. Wang, W.R. Zhou, C.E. Liu, L.J. Wang // Petroleum. – 2018. – Vol. 4. – Iss. 3. – P. 358–363.
53. Case study of a novel acid-diversion technique in carbonate reservoirs, Canada / F.F. Chang, T. Love, C.J. Affeld, J.B. Blevins, R.L. Thomas, D.K. Fu // Annual Technical Journal and Exhibition. – 2021. – Vol. 11. – P. 37–48.
54. Paccaloni G., Tambini M. Advances in matrix stimulation technology, Canada // Journal of petroleum technology. – 2022. – Vol. 121. – P. 457–458.
55. Paccaloni G. A new, effective matrix stimulation diversion technique, Texas // Journal of Drilling&Completion. – 2022. – Vol. 12. – P. 77–89.

Информация об авторах

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

Поступила в редакцию: 02.04.2024

Поступила после рецензирования: 26.04.2024

Принята к публикации: 24.12.2024

REFERENCES

1. Alleman D., Qi Qu, Keck R. The Development and successful field use of viscoelastic surfactant-based diverting agents for acid stimulation. *International Journal of Oilfield Chemistry*, 2020, vol. 01, pp. 45–48.
2. Akhmad F.F., Gaibalyev G.G. Intensification of oil inflow by isolating water inflows in the bottomhole zone. *Scientific Petroleum*, 2022, no. 2, pp. 23–27.
3. Lyatifov Ya.A. Non-stationary exposure to a thermoactivated polymer composition for deep leveling of the filtration profile. *Scientific Petroleum*, 2021, no. 1, pp. 25–30. (In Russ.)
4. Senashov S.I., Savostyanova I.L., Cherepanova O.N. Numerical-and-analytic method for solving cauchy problem of one-dimensional gas dynamics. *Journal of Siberian federal university. mathematics and physics*, 2022, vol. 15 (4), pp. 444–449. DOI: 10.17516/1997-1397-2022-15-4-444-449.
5. Khabibullin M.Ya. Investigation of the processes occurring in the pipe string during the wellhead pulsed injection of fluid into the well. *Neftgazovoe delo*, 2018, vol. 16, no. 6, pp. 34–39. (In Russ.) DOI: 10.17122/ngdelo-2018-6-34-39.

6. Firme P.A.L.P., Pereira F.L.G., Roehl D., Romanel C. A probabilistic assessment of the casing integrity in a Pre-salt wellbore. *50th US Rock Mechanics Geomechanics Symposium*. USA, Houston, 2016, vol. 3, pp. 2555–2564.
7. Aregbe A.G. Wellbore stability problems in deepwater gas wells. *World Journal of Engineering and Technology*, 2017, vol. 05, no. 04, pp. 626–647.
8. Zhang J., Lu Y. Study on temperature distribution of ultra-deep wellbore and its effect on mechanical properties of surrounding rock. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2019, vol. 38, pp. 2831–2839.
9. Manshad A., Jalalifar H., Aslannejad M. Analysis of vertical, horizontal and deviated wellbores stability by analytical and numerical methods. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 2014, vol. 4, pp. 359–369.
10. Khabibullin M.Ya., Suleimanov R.I. Improving the reliability of pipeline welded joints in the reservoir pressure maintenance system. *Oil and Gas Business*, 2019, vol. 17, no. 5, pp. 93–98. (In Russ.). DOI: 10.17122/ngdelo-2019-5-93-98
11. Rogov E.A. Investigation of the permeability of the bottomhole zone of wells under the influence of process fluids. *Zapiski Gornogo instituta*, 2020, vol. 242, pp. 169–173. (In Russ.) DOI: 10.31897/PMI.2020.2.169.
12. Zaichenko A.Yu., Glazov S.V., Salgansky E.A. Filtration combustion of viscous hydrocarbon liquids. *Theoretical foundations of chemical engineering*, 2017, vol. 51, no. 5, pp. 673–679.
13. Orlov M.S., Roschin P.V., Struchkov I.A., Litvin V.T. The application of X-ray Micro Computed Tomography (Micro-CT) of core sample for estimation of physicochemical treatment efficiency. *SPE Russian Petroleum Technology Conference*. Moscow, Russia, 2015. SPE-176600-MS. DOI: 10.2118/176600-MS.
14. Assem A.I., Nasr-El-Din H.A., De Wolf C.A. Formation damage due to iron precipitation in carbonate rocks. *SPE European Formation Damage Conference & Exhibition*, 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.2118/165203-MS>
15. Lian Zhanghua, Luo Zeli, Yu Hao. Assessing the strength of casing pipes that contain corrosion pit defects. *Journal of Southwest Petroleum University*, 2018, vol. 40, no. 2, pp. 86–94.
16. Khabibullin M.Ya. Improving the process of hydrochloric acid treatment of wells using the latest technologies and equipment. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 10, pp. 128–134. (In Russ.). DOI: 10.18799/24131830/2020/10/2861.
17. Henyang Wang, Podgornov V.M. Designing locations for thermal compensators to prevent deformation of multilayer filters in a horizontal wellbore of a steam injection well. *Gas industry*, 2019, no. 4, pp. 38–44. (In Russ.)
18. Kashnikov Yu.A., Ashikhmin S.G., Kukhtinsky A.E. On the relationship between crack resistance coefficients and geophysical characteristics of rocks of hydrocarbon deposits. *Zapiski Gornogo instituta*, 2020, vol. 241, pp. 83–90. (In Russ.). DOI: 10.31897/PMI.2020.1.83.
19. Shakhverdiev A.Kh., Arefiev S.V. Forecast of water breakthrough during flooding in conditions of instability of the front of oil displacement by water. *SOCAR Proceedings*, 2023, no. 3, pp. 58–67. (In Russ.) DOI: 10.5510/OGP20230300887.
20. Nazarov U.S., Salidjanova N.S., Nashvandov Sh.M., Xidirov O.L. Some features of quaternary ammonium compounds as a corrosion inhibitor in environments with sulfate-reducing bacteria. *Scientific Petroleum*, 2022, vol. 1, pp. 52–62.
21. Khabibullin M.Ya. Increasing the efficiency of separation of liquid systems during the collection of reservoir fluid. *Oil and gas business*, 2020, vol. 18, no. 2, pp. 64–71. (In Russ.). DOI: 10.17122/ngdelo-2020-2-64-71.
22. Shakhverdiev A.Kh., Arefiev S.V. Concept of monitoring and optimization of the process of flooding of oil reservoirs with instability of the displacement front. *Oil industry*, 2021, no. 11, pp. 104–109. (In Russ.)
23. Dvoynikov M.V., Oshibkov A.V. Analysis of design solutions and technological methods for designing and implementing profiles of directional and horizontal wells. *Izvestia of higher educational institutions. Oil and gas*, 2013, no. 4, pp. 40–43. (In Russ.).
24. Kane S.A., Shvets S.V. Evaluation of the complexity of the trajectory of horizontal wells when lowering casing strings. *Construction of oil and gas wells on land and at sea*, 2015, no. 7, pp. 38–41. (In Russ.)
25. Khabibullin M.Ya., Suleimanov R.I. Automatic packer reliability prediction under pulsed transient flooding of hydrocarbon reservoirs. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Novosibirsk, 2019. pp. 012024. DOI: 10.1088/1757-899X/560/1/012024.
26. Gupta V.P., Sanford S.R., Mathis R.S., Dipippo E.K., Egan M.J. Case history of a challenging thin oil column Extended Reach Drilling (ERD) development at Sakhalin. *Paper SPE/IADC*, 2013, vol. 12, pp. 163487.
27. Helmy M.W. Application of new technology in the completion of ERD wells. *Sakhalin-1 Development. Paper S.P.E.*, 2006, vol. 8, pp. 103587.
28. Suleimanov R.I., Khabibullin M.Ya., Suleimanov R.I. Analysis of the reliability of the power cable of an electric-centrifugal pump unit. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. International Conference on Innovations and Prospects of Development of Mining Machinery and Electrical Engineering* 2019, pp. 012054. DOI: 10.1088/1755-1315/378/1/012054
29. Hossain M.E., AlMejed A.A. *Fundamental of sustainable drilling engineering*. Chichester, Scrivener Publ. LLC, 2015. 786 p.
30. Shvets S.V., Kane S.A. Influence of horizontal well trajectory parameters on casing string running. *Construction of oil and gas wells on land and at sea*, 2014, no. 7, pp. 19–23. (In Russ.).
31. James R.W., Pastusek P.J., Kuhn G.R., Andreev A.F., Bailey J.R., Wang L.W. Successful Optimization strategies combine to deliver significant performance boost at the edge of the ERD envelope. *Sakhalin Island. Russia. Paper S.P.E. San Diego*, 2012, vol. 9, pp. 150959.
32. Khabibullin M.Ya. Managing the processes accompanying fluid motion inside oil field converging-diverging pipes. *Journal of Physics: Conference Series. International Conference «Information Technologies in Business and Industry»*, 2019, pp. 042012. DOI: 10.1088/1742-6596/1333/4/042012
33. Sanford S.R., Walker M.W., Brock J.N., Jellison M.J., Muradov A.F. New rotary shouldered connection expands the capability of world record ERD operation. *Paper SPE/IADC. Fort Worth*, 2014, vol. 5, pp. 168049.
34. Schamp J.H., Estes B.L., Keller S.R. Torque reduction techniques in ERD wells. *Paper SPE/IADC. Miami*, 2006, vol. 14, pp. 98969.
35. Tretyak A.A., Savenok O.V., Shvets V.V. *Downhole filters*. Novochoerkassk, Coloring Publ., 2019. 227 p. (In Russ.).

36. Bahamon J.I., Garcia C.E., Ulloa M.J., Leal J.H. Successful implementation of hydraulic fracturing techniques in high permeability heavy oil wells in the Llanos Basin-Colombia. *Ecopetrol SPE. Weatherford*, 2015, vol. 54, pp. 136425.
37. Galimullin M.L., Khabibullin M.Ya. Experience with sucker-rod plunger pumps and the latest technology for repair of such pumps. *Chemical and Petroleum Engineering*, 2020, vol. 55, no. 11–12, pp. 896–901. DOI: 10.1007/s10556-020-00710-1
38. Shcherbakova K.O. Analysis of the problem of high water cut of produced products from horizontal wells. *Proceedings of Higher Educational Establishments: Geology and Exploration*, 2022, no. 6, pp. 29–38. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2022-64-6-29-38>.
39. Dennar L., Amro M., Reichmann S. Polymer Selection for Enhanced Oil Recovery in a Niger-Delta Formation Via Laboratory Experiments. *SPE Nigeria Annual International Conference and Exhibition*, 2022, SPE-211928-MS. DOI: <https://doi.org/10.2118/211928-MS>.
40. Khabibullin M.Ya. Theoretical grounding and controlling optimal parameters for water flooding tests in field pipelines. *Journal of Physics: Conference Series. International Conference «Information Technologies in Business and Industry»*, 2019, pp. 042013. DOI: 10.1088/1742-6596/1333/4/042013
41. Shvets S.V., Kane S.A. Prospects for using the method of running casing strings with a lightweight lower section. *Electronic scientific journal «Resources of the European North. Technologies and economics of development»*, 2015, no. 2, pp. 81–90. (In Russ.).
42. Khabibullin M.Ya. The method of thermal acid pulse for increasing oil recovery. *Oil and gas business*, 2020, vol. 18, no. 4, pp. 58–64. (In Russ.) DOI: 10.17122/ngdelo-2020-4-58-64.
43. Karim A., Du C., Hansson G. Influence of exposure to 980 nm laser radiation on the luminescence of Si: Er/O light-emitting diodes. *Journal of applied physics*, 2008, vol. 12, pp. 123110. Available at: <http://dx.doi.org/10.1063/1.3050316> (accessed 15 July 2022).
44. Viktorin R.I., McDermott J.K., Rush R.C., Schamp J.L. The next generation of Sakhalin Extended-Reach Drilling. *Paper SPE/IADC. Miami*, 2006, vol. 3, pp. 99131.
45. Khabibullin M.Ya. Managing the reliability of the tubing string in impulse non-stationary flooding. *Journal of Physics: Conference Series. International Conference «Information Technologies in Business and Industry». 4 – Mechatronics, Robotics and Electrical Drives*, 2019, pp. 052012. DOI: 10.1088/1742-6596/1333/5/052012.
46. Walker M.W. Pushing the extended reach envelope at Sakhalin: an operator's experience drilling a record reach well. *Paper SPE/IADC. San Diego*, 2012, vol. 9, pp. 151046.
47. Walker M.W., Veselka A., Harris S.A. Increasing Sakhalin extended reach drilling and completion capability. *Paper SPE/IADC. Amsterdam*, 2009, vol. 4, pp. 119373.
48. Ambekar A.S., Sivakumar R.H., Anantharaman N.A., Vivekenandan M.D. CFD simulation study of shelf and tube heat exchangers with different baffle segment configurations. *Applied Thermal Engineering*, 2016, vol. 108, pp. 999–1007.
49. Ferreira V.H., Clinckspoor K.J., Vermelho A.B., Cardoso V.S. Mechanical Degradation of Biopolymers for Enhanced Oil Recovery Applications. *SPE Journal*, 2022, vol. 27(04), pp. 2052–2072. DOI: <https://doi.org/10.2118/209579-PA>.
50. Zangaliyev M.M., Hashmet M.R., Pourafshary P. Laboratory Investigation of Hybrid Nano-Assisted-Polymer Method for EOR Applications in Carbonate Reservoirs. *Offshore Technology Conference Asia, OTC-31398-MS*, 2022. DOI: <https://doi.org/10.4043/31398-MS>.
51. Wang Hanyang, Podgornov V.M., Mo Jiyali. Experimental studies of the efficiency of downhole filter elements in a high-viscosity oil flow. *Construction of oil and gas wells on land and at sea*, 2022, no. 01, pp. 43–47. (In Russ.).
52. Xiong Y.A., Xu H.J., Wang Y.D., Zhou W.R., Liu C.E., Wang L.J. Fluid flow with compaction and sand production in unconsolidated sandstone reservoir. *Petroleum*, 2018, vol. 4, Iss. 3, pp. 358–363.
53. Chang F.F., Love T., Affeld C.J., Blevins J.B., Thomas R.L., Fu D.K. Case study of a novel acid-diversion technique in carbonate reservoirs. *Annual Technical Journal and Exhibition*, 2021, vol. 11, pp. 37–48.
54. Paccaloni G., Tambini M. Advances in matrix stimulation technology. *Journal of petroleum technology*, 2022, vol. 121, pp. 457–458.
55. Paccaloni G. A new, effective matrix stimulation diversion technique. *Journal of Drilling & Completion*, 2022, vol. 12, pp. 77–89.

Information about the authors

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

Received: 02.04.2024

Revised: 26.04.2024

Accepted: 24.12.2024

УДК 504.054
DOI: 10.18799/24131830/2025/2/4517
Шифр специальности ВАК: 1.6.21

Процессы формирования подотвальных вод и мероприятия по минимизации их влияния на гидросферу (на примере Лёвихинского рудника, Средний Урал)

Л.С. Рыбникова, П.А. Рыбников, А.Н. Галин✉

Институт горного дела УрО РАН, Россия, г. Екатеринбург

✉aynur.galin.1997@mail.ru

Аннотация. *Актуальность* работы определяется тем, что на протяжении почти ста лет на Лёвихинском руднике происходит непрерывное формирование кислых подотвальных вод, которые являются значимым источником загрязнения гидросферы. **Цель:** анализ состава пород отвала и подотвальных вод для обоснования мероприятий по минимизации их воздействия на окружающую среду. **Объекты:** подотвальные воды, которые формируются в отвале Лёвихинского медноколчеданного рудника. **Методы:** работа основана на результатах гидрохимического опробования подотвальных вод и химического опробования проб пород отвала, определении соответствия качества воды и пород отвала установленным нормативным требованиям; выполнении сбора, анализа и обработки гидрологической и статистической информации; литературном поиске и анализе наилучших доступных технологий для предотвращения загрязнения гидросферы от объектов накопленного вреда. **Результаты.** На Лёвихинском медноколчеданном месторождении (Средний Урал) отвалы пустых вмещающих и вскрышных пород объемом 1,7 млн м³ размещены на площади 30 га. В основании самого крупного из них разгружаются кислые подотвальные воды, расход которых в паводок превышает 1 тыс. м³/сут. Состав воды сульфатный, преобладающие катионы – железо и алюминий, минерализация изменяется от 13 до 52 г/дм³, pH достигает 1,9. Концентрации элементов в подотвальной воде зависят от сезона и климатических условий. Породы отвала представлены преимущественно кварцами, полевыми шпатами и глинистыми минералами, наблюдаются высокие содержания серы, меди, цинка, мышьяка, кобальта и кадмия. Размер эколого-экономического ущерба в результате поступления подотвальных вод составляет более 95 млн р. в год. Для минимизации воздействия подотвальных вод на окружающую среду рассмотрено два направления: рекультивация отвала и очистка подотвальной воды, выполнен сравнительный анализ их достоинств, недостатков и затрат на реализацию природоохранных мероприятий.

Ключевые слова: Лёвихинский рудник, медноколчеданное месторождение, подотвальные воды, вмещающие породы, минеральный состав, химический состав, коэффициент опасности, кларк концентрации, рекультивация отвала, очистка подотвальной воды

Благодарности: Работа выполнена в рамках Государственного задания Института горного дела УрО РАН. Тема 2 (2025–2027 гг.). Геоинформационное обеспечение системной оценки стратегий природосбережения при освоении ресурсов недр (FUWE-2025-0002). Г.р. № 1022040300092-1-1.5.1

Для цитирования: Рыбникова Л.С., Рыбников П.А., Галин А.Н. Процессы формирования подотвальных вод и мероприятия по минимизации их влияния на гидросферу (на примере Лёвихинского рудника, Средний Урал) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 2. – С. 102–115. DOI: 10.18799/24131830/2025/2/4517

UDC 504.054

DOI: 10.18799/24131830/2025/2/4517

Processes of formation of waste waters and measures to minimize their impact on the hydrosphere (on the example of the Levikhinsky mine, Middle Urals)

L.S. Rybnikova, P.A. Rybnikov, A.N. Galin✉

Institute of Mining UB RAS, Ekaterinburg, Russian Federation

✉aynur.galin.1997@mail.ru

Abstract. Relevance. There is a continuous formation of acidic waste waters at the Levikhinsky mine, while negatively affecting the hydrosphere for almost a hundred years. **Aim.** To establish the relationship between the composition of the waste rock and the waste water in order to justify measures to minimize the waste water impact on the environment. **Objects.** Waste water formed in the dump of the Levikhinsky copper and cobalt mine. **Methods.** The work is based on the results of hydrochemical sampling of waste water and chemical sampling of dump rocks, determination of compliance of water quality and dump rocks with the established regulatory requirements; collection, analysis and processing of hydrological and statistical information; literature search and analysis of the best available technologies to prevent pollution of the hydrosphere from objects of accumulated harm. **Results.** There are more than a dozen waste dumps with a total area of 30 hectares and a volume of 1,7 million m³ at the Levikhinsky copper-pyrite deposit (Middle Urals). At the base of the largest of them, for several decades, acidic bottom waters are discharged, the flow rate of which exceeds 1 thousand m³/day in floods. Water composition is sulfate, predominant cations are iron and aluminum, mineralization varies from 13 to 52 g/dm³, pH reaches 1,9. The concentrations of elements in the dump water depend on the season and climatic conditions. The rocks of the dump are represented mainly by quartz, feldspars and clay minerals; high concentrations of sulfur, copper, zinc, arsenic, cobalt and cadmium are observed. The amount of ecological and economic damage as a result of intake of waste water is more than 95 million rubles per year. To minimize the impact of waste waters on the environment, the authors have considered two directions: dump remediation and waste water treatment, and performed a comparative analysis of their advantages, disadvantages and costs for the implementation of environmental protection measures.

Keywords: Levikhinsky mine, copper-pyrite deposit, bottom waters, host rocks, mineral composition, chemical composition, hazard ratio, concentration clark, dump reclamation, bottom water treatment

Acknowledgements: The work was carried out under the State Assignment of the Institute of Mining, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. Theme 2 (2025–2027). Geoinformation support of systemic assessment of nature conservation strategies in the development of subsoil resources (FUWE-2025-0002). G.r. no. 1022040300092-1-1.5.1

For citation: Rybnikova L.S., Rybnikov P.A., Galin A.N. Processes of formation of waste waters and measures to minimize their impact on the hydrosphere (on the example of the Levikhinsky mine, Middle Urals). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 2, pp. 102–115. DOI: 10.18799/24131830/2025/2/4517

Введение

В процессе горнодобывающей деятельности образуются различные техногенно-минеральные образования, в том числе отвалы вскрышных пород, забалансовых руд и т. д. Отчуждение плодородных участков земли, повышение пылевой нагрузки в результате ветровой эрозии, загрязнение почв из-за аэротехногенного переноса, загрязнение гидросферы подотвальными водами являются результатами негативного влияния отвалов на различные элементы окружающей среды. В первую очередь негативное влияние отвалов медно-колчеданных месторождений на окружающую среду определяется их вещественным составом. Данная проблема актуальна уже долгое время по всему миру [1–7].

Территория отработанного Лёвихинского месторождения является одним из основных объектов накопленного вреда [8] на территории Свердловской области. Начиная с 1927 г. отвалы вскрышных пород, окисленных и сульфидных забалансовых руд складировались на неподготовленном основании. Интенсивное выщелачивание элементов с тела отвала происходит на протяжении почти ста лет, что привело к значительному загрязнению прилегающей территории, поверхностных и подземных вод. Обогащенные кислородом атмосферные осадки, контактируя с вмещающими породами, обогащаются металлами, сульфат-ионом и другими компонентами. Непрерывное формирование кислых подотвальных вод негативно отражается на водных

объектах, а также на флоре и фауне прилегающих территорий.

Целью работы является анализ состава пород отвала и подотвальных вод для обоснования мероприятий по минимизации их воздействия на окружающую среду.

Для достижения этой цели были решены следующие задачи: выполнен анализ химического состава пород отвала и подотвальных вод; предложены мероприятия по минимизации воздействия подотвальных вод на окружающую среду.

Объект исследования

Лёвихинская группа медноколчеданных месторождений находится в Кировградском районе Свердловской области (рис. 1). Эксплуатация открытым способом началась в 1927 г., а подземным способом позднее. В 2003 г. остановлен водоотлив на руднике и началось затопление горных выработок. В 2007 г. появился сосредоточенный выход кислых шахтных вод с расходом до 2,9 тыс. м³/сут.

11 отвалов общей площадью 0,3 км² и объемом 1,7 млн м³ находятся на территории Лёвихинского рудного поля. Самый большой из них имеет площадь 22,6 га и объем 1,45 млн м³ и находится в южной части возле шахты «Лёвиха-ХП» (рис. 1) [9]. Здесь в течение нескольких десятков лет идёт разгрузка кислых подотвальных вод с расходом в паводок до 1250 м³/сут. Отдельного сбора и нейтрализации подотвальных вод нет, и это пагубно отражается на флоре (рис. 2). Раз-

гружаясь они попадают в русло р. Лёвиха и далее в пруд-осветлитель. Севернее в него со станции нейтрализации со средним расходом 3,2 тыс. м³/сут. поступает нейтрализованная шахтная вода. Очищенные шахтные воды сбрасываются из пруда-осветлителя в русло р. Лёвихи и далее в р. Тагил [10].

Отвалы сложены пустыми вмещающими породами, содержащими вкрапленные сульфиды, представленными преимущественно пиритом, халькопиритом, сфалеритом, марказитом, и вскрышными породами, представленными амфиболитами и серицитовыми сланцами [9].

Из-за процессов дробления и разрушения пород при добыче происходит увеличение их фильтрационных свойств. По всей поверхности отвала происходит практически полное поглощение атмосферных осадков, обогащенных кислородом [11].

К формированию ряда сульфатных солей, которые включают продукты выветривания сульфидов, приводят процессы окисления, гидролиза и испарения. В теле отвала происходит образование и накопление водорастворимых вторичных минералов или неосульфатов. Основными из них являются минералы, содержащие железо, а также семиводные сульфаты, аналогичные мелантериту, но с переменным соотношением четырех главных металлов – железа, меди, цинка, магния. Повышенной растворимостью характеризуются сульфаты из групп мелантерита, розенита, эпсомита, галотрихита, копиапита [12].

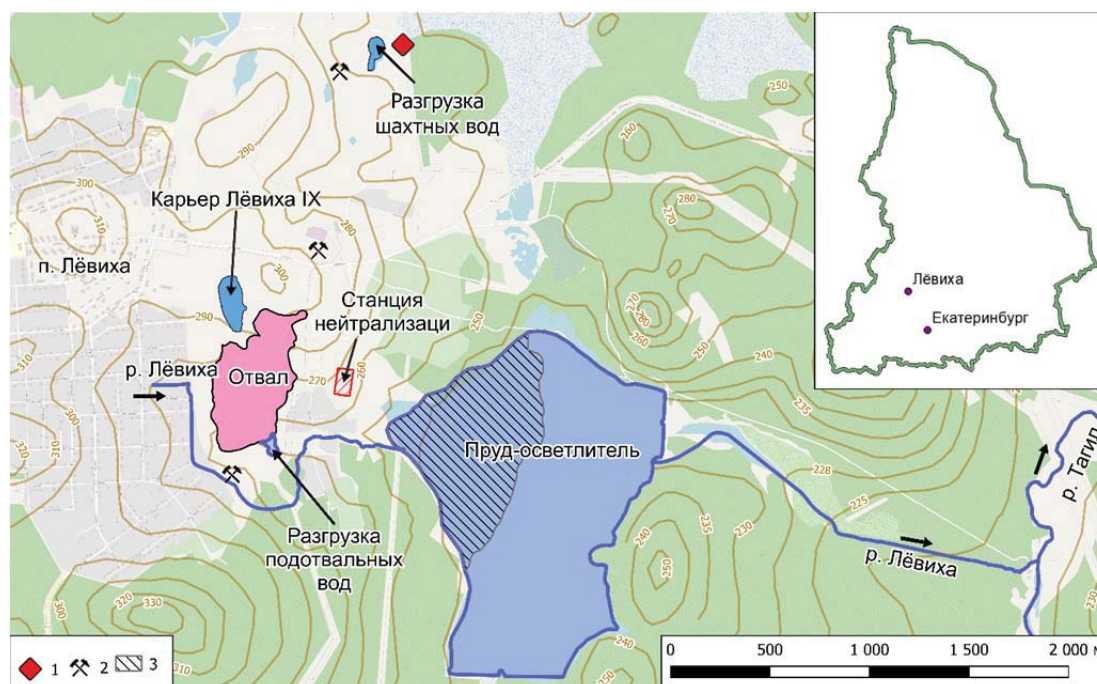


Рис. 1. Обзорная схема расположения объектов в районе отработанного Лёвихинского медноколчеданного рудника: 1 – станция перекачки шахтных вод; 2 – шахты; 3 – пляж пруда-осветлителя

Fig. 1. Overview scheme of the location of facilities in the area of the depleted Levikhinsky copper and cobalt mine: 1 – mine water pumping station; 2 – mines; 3 – clarifier pond beach



Рис. 2. Зона разгрузки подотвальных вод
Fig. 2. Waste water discharge zone

В связи с тем, что тело отвала расположено выше поверхности земли, между внутренней частью отвала и поверхностью существует температурный градиент, который зависит от сезона и времени суток, что, в свою очередь, приводит к изменению растворимости минералов в зависимости от сезона и времени суток. В теле отвала происходит циклический процесс окисления, растворения, осаждения минералов. Все эти процессы приводят к формированию специфического гидрохимического состава вод, которые разгружаются по периметру отвала [13–15].

Методы исследования

Для анализа состава пород отвала и подотвальных вод Лёвихинского рудника использовались результаты работ, выполненных в 2020–2021 гг. лабораторией геоинформационных и цифровых технологий в недропользовании Института горного дела УрО РАН по заданию Министерства природных ресурсов и экологии Свердловской области.

Было отобрано 12 проб пород отвала. Опробование выполнялось точечным способом в сухую погоду. Расположение точек опробования показано на рис. 3. Пробы отбирались в соответствии с ГОСТ 17.4.4.02-2017 [16].

Анализ химического состава пород отвала выполнены в аналитическом сертификационном испытательном центре института проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов РАН (г. Черноголовка).

Состав подотвальных вод анализировался в наблюдательной точке в месте их разгрузки (рис. 1). Всего было отобрано 5 проб: 2 в летний период, 2 в осенний и 1 в весенний. Определялись pH, H^+ , Na^+ , K^+ , NH_4 , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Al^{3+} , $Fe_{общ}$, Fe^{2+} , Fe^{3+} , Cu^{2+} , Zn^{2+} , Mn^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- , NO_2^- , HCO_3^- , CO_3^{2-} , Si, Be, Cd (AA), Co, As, Ni, Pb, Se, сухой остаток, минерализация, SiO_2 , окисляемость и жёсткость. Пробы отбирались в соответствии с ГОСТ Р 59024-2020 [17]. Состав подотвальных вод получен с использованием следующих методов: пламенно-эмиссионной спектрометрии, пламенно-атомно-абсорбционной, фотометрической с реактивом Грисса, потенциометрической с ионоселективным электродом, гравиметрического, меркуриметрического, титриметрического, масс-спектрометрии с ионизацией в индуктивно связанной плазме. Анализ выполнен в химико-аналитическом центре Института промышленной экологии УрО РАН.

Для анализа полученного массива данных удобно использовать безразмерные показатели. В качестве величин, относительно которых нормируются анализируемые показатели, могут использоваться предельно-допустимые значения для водоемов рыбохозяйственного значения (ПДК_{рх}) [18] и почв (ПДК_п) [19]. Был использован коэффициент опасности $K_o = C_i / C_{пдк}$, где C_i – концентрация i -го вещества; $C_{пдк}$ – предельно допустимая концентрация i -го вещества.

В качестве основного методологического подхода по оценке экологического ущерба, причиненного водному объекту в результате поступления подотвальных вод на Лёвихинском руднике, была использована методика оценки размера вреда [20], наносимого водному объекту, разработанная в соответствии с Водным кодексом. Данная методика используется для количественной оценки экологического ущерба (в денежном выражении), который причиняется поступлением подотвальных вод поверхностным водным объектам.

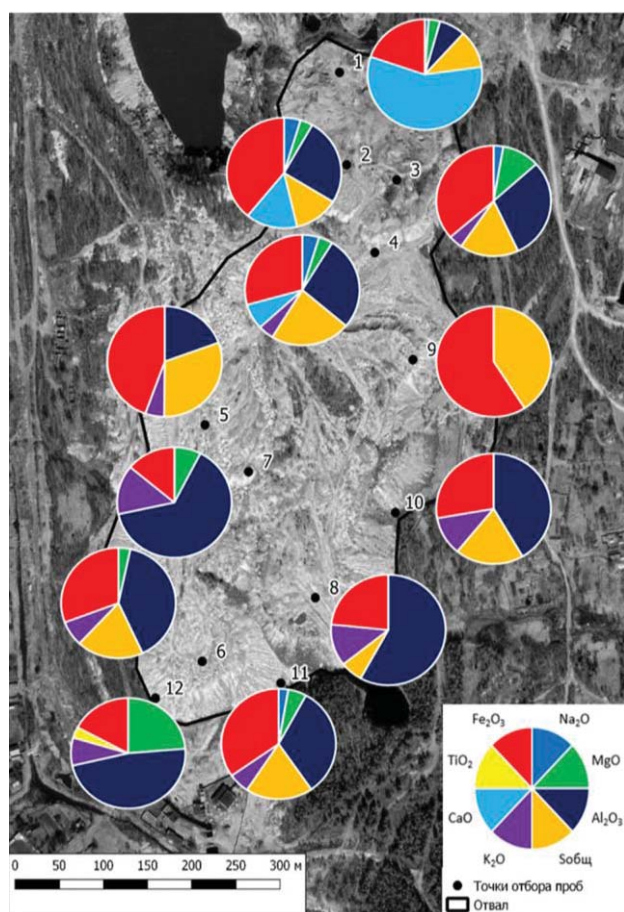


Рис. 3. Расположение точек отбора проб из отвала и их химический состав

Fig. 3. Location of sampling points from the dump and their chemical composition

Результаты исследования

Химические анализы проб, отобранных в ручьях, текущих с отвала, показывают сильно кислую реакцию среды (pH=1,92–2,6), состав воды сульфатный магниевое-алюминиево-железистый, минерализация варьирует от 13 до 52 г/л, воды имеют высокие концентрации (г/л) сульфат-иона (10–39), железа (1,5–8,7), алюминия (0,6–2,9), магния (0,4–1,7), меди (0,09–0,3), цинка (0,1–0,3) (табл. 1). Состав воды очень сильно зависит от сезона и ко-

личества осадков за предшествующие 7 дней, при этом pH не показывает такой зависимости.

Таблица 1. Состав подотвальных вод

Table 1. Composition of waste waters

Дата опробования Sampling date	Формула Курлова Kurlov's formula
04.08.2020	M23,5 $\frac{SO_4 100}{Fe^{3+} 46 Al 31 Mg 17}$ pH 2,31 T 18,1 °C Eh 566 mV
13.10.2020	M52,1 $\frac{SO_4 100}{Fe^{3+} 56 Al 22 Mg 17}$ pH 2,16 T 8,5 °C Eh 554 mV
14.04.2021	M13,0 $\frac{SO_4 100}{Fe^{3+} 36 Al 34 Mg 19}$ pH 2,60 T 11,4 °C Eh 244 mV
04.08.2021	M44,0 $\frac{SO_4 100}{Al 42 Fe^{3+} 41 Mg 14}$ pH 1,92 T 25 °C Eh 300 mV
24.09.2021	M38,5 $\frac{SO_4 100}{Fe^{3+} 42 Al 31 Mg 22}$ pH 2,26 T 14,4 °C Eh 281 mV

Средние превышения ПДК_{рх} в подотвальной воде доходят до 213 тыс. раз (Cu), а породе отвала – до 250 раз (S) (рис. 4).

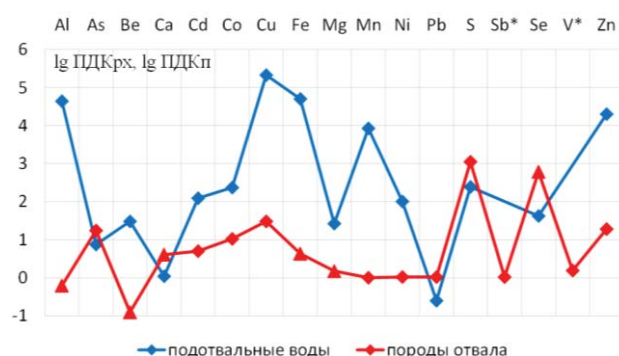


Рис. 4. Геохимический спектр распределения элементов по отношению к ПДК в подотвальной воде (ПДК_{рх}) и в породе отвала (ПДК_п) (красный треугольник – по отношению КК, так как отсутствует ПДК), * – не определялся в подотвальной воде

Fig. 4. Geochemical distribution spectrum of elements in relation to MPC in waste water (MPC_{fish}) and in the dump rock (MPC_s) (red triangle – in relation to CC, as there is no MPC), * – not determined in waste water

Максимальные показатели значений коэффициента опасности элементов в породе отвала (числитель) и в подотвальной воде (знаменатель) представлены в виде обобщенной ассоциации, где в скобках показана кратность превышения ПДК:

- I класс опасности: $\frac{Zn(37)As(33)Cd(10)Pb(2)}{Cu(60)Ni(2)Sb(2)}$;
- II класс опасности: $\frac{Cu(60)Ni(2)Sb(2)}{Cd(156)Se(45)Be(33)}$;

- III класс опасности: V(3)Mn(2);
Cu(332 200)Zn(30 370)Co(260)Ni(110)As(10);
- IV класс опасности: Fe(86 700)Al(72 500)Mn(13 460)Mg(42)Ca(2);

В породе отвала присутствуют элементы I класса опасности с максимальными превышениями ПДКп до 37 раз (Zn) и II класса опасности – до 60 раз (Cu). В подотвальной воде максимальные превышения ПДКрх достигают 156 раз (Cd) для элементов II класса опасности, для III класса опасности – 332 тыс. раз (Cu) и для IV класса опасности – 86 тыс. раз (Fe).

Оценка эколого-экономического ущерба

Размер вреда (У, тыс. р.), причиненного водному объекту сбросом вредных (загрязняющих) веществ в составе подотвальных вод, рассчитывается по формуле [20]:

$$U = K_{вг} \cdot K_{в} \cdot K_{ин} \cdot \sum_{i=1}^n H_i \cdot M_i \cdot K_{из},$$

где $K_{вг}$, $K_{в}$, $K_{ин}$, $K_{из}$ – коэффициенты, учитывающие природно-климатические условия, экологические факторы, инфляционную составляющую, интенсивность негативного воздействия вредных (загрязняющих) веществ на водный объект; H_i – таксы для исчисления размера вреда от сброса i -го вредного (загрязняющего) вещества в водные объекты, тыс. р./т; $M_i = Q(C_{фи} - C_{ди})T \cdot 10^{-6}$; M_i – масса сброшенного i -го вредного (загрязняющего) вещества определяется по каждому загрязняющему веществу, т; Q – расход подотвальных вод с превышением содержания i -го вредного (загрязняющего) вещества, м³/ч; $C_{фи}$ – средняя фактическая за период сброса концентрация i -го вредного (загрязняющего) за период времени T , мг/дм³; $C_{ди}$ – допустимая концентрация i -го вредного (загрязняющего) вещества, мг/дм³; T – продолжительность сброса подотвальных вод, час; 10^{-6} – коэффициент перевода массы вредного (загрязняющего) вещества в т.

Расход подотвальных вод в межень практически отсутствует, в паводок достигает 1250 м³/сут. Площадь отвала составляет 0,226 км². Количество осадков за 2019–2020 гг. составило 581–590 мм. При условии, что все выпавшие на площадь отвала осадки поступают в его тело, получаем, что среднегодовой расход подотвальных вод составляет 365 м³/сут (4,2 л/с).

Масса ежегодного выноса элементов 900 т, в том числе более 600 т железа, более 200 т алюминия, десятки килограммов меди, цинка, марганца (табл. 2).

Размер эколого-экономического ущерба (для элементов, превышающих ПДКрх), причиненного реке Лёвиха при поступлении в неё подотвальных вод, превышает 95 млн р. в год. Основной вклад вносят железо, алюминий, медь и цинк (табл. 2)

Таблица 2. Масса выноса элементов с подотвальными водами и размер экологического ущерба

Table 2. Mass of removal of elements with waste water and the amount of environmental damage

Загрязняющее вещество Contaminant	Среднее содержание, мг/л Average content, mg/L	Кратность ПДКрх MACfish multiplicity	Масса выноса (M_i), т/год Weight of removal (M_i), t/year	Ущерб, тыс. р. Damage, thousand rubles
Al	1535	38381	202	16240
As	0,5	10	0,06	53
Be	0,01	33	0,001	589
Cd	0,8	156	0,1	15073
Co	2,6	260	0,3	932
Cu	224	223835	29	2370
Zn	206	20554	27	2179
Fe	4791	47913	630	50689
Mn	88	8800	12	931
Ni	1,1	110	0,1	646
Se	0,08	39	0,01	5 457
Итого/Total			900	95160

Физико-химическое моделирование процессов формирования подотвальных вод Лёвихинского месторождения, выполненное с использованием программного кода Visual MINTEQ ver. 3.0/3.1, показало, что загрязнение окружающей среды кислыми водами будет продолжаться сотни лет [21].

Внедрение современных технологий и технических решений позволит значительно снизить экологический ущерб р. Лёвиха.

Рекомендуемые мероприятия

Литературный поиск [22, 23] и анализ показал, что мероприятия по минимизации воздействия подотвальных вод на окружающую среду могут быть реализованы двумя способами: А – рекультивацией отвала; Б – сбором и очисткой подотвальных вод.

Мероприятие А – рекультивация отвалов

Рекультивация отвала может быть выполнена с использованием: варианта А1 – бентонитовых матов [24] или варианта А2 – грунтобетона [25].

Вариант А1. На техническом этапе рекультивации выполняется планировка поверхности, покрытие песчано-гравийной смесью, укладка экранирующего слоя из бентонитовых матов «Bentizol» [26], нанесение искусственного субстрата из потенциально-плодородного грунта. На биологическом этапе рекультивации вносятся удобрения и осуществляется посев многолетних семян травосмеси (табл. 3).

Вариант А2. На техническом этапе после грубой и чистовой планировки укладывается экранирующий слой из грунтобетона, сверху суглинок и почвенный слой. На биологическом этапе укладывается биополотно (табл. 3).

Таблица 3. Необходимое количество материалов и их экономические показатели для рекультивации отвала

Table 3. Required amount of materials and their economic indicators for dump reclamation

Материал/Material	Количество/Amount	Стоимость, тыс. р./Cost, thous. rub.
Вариант А1 (бентонитовые маты)/Option 1 (bentonite mats)		
Песчано-гравийная смесь, м³ Sand and gravel mixture, m³	33900	15102
Бентонитовые маты «Bentizol» марки «SAB 5», га Bentonite mats "Bentizol" brand "SAB 5", ha	22,6	56500
Бентонитовые гранулы, т Bentonite granules, t	22	550
Объёмная георешетка Геотех® [27], га Geotech® volumetric geogrid [27], ha	6	11700
Искусственный субстрат (плодородный грунт), м³ Artificial substrate (fertile soil), m³	33900	43748
Удобрение, кг/Fertilizer, kg	2260	32
Семена травосмеси, кг Grass mixture seeds, kg	1582	221
Древесная мульча, кг/Wood mulch, kg	29380	4701
Вода для полива, л/Water for irrigation, L	135600	2
Итого/Total		132556
Вариант А2 (грунтобетон)/Option 2 (soil concrete)		
Грунтобетон, м³/Soil concrete, m³	33900	254000
Объёмная георешетка Геотех®, га Geotech® volumetric geogrid, ha	6	8370
Суглинок, м³/Loam, m³	67800	6102
Чернозём, м³/Chernozem, m³	113000	62150
Биополотно, га/Bioshelf, ha	22,6	28250
Итого/Total		358872

Затраты на рекультивацию отвала в зависимости от используемого материала различаются в 2,7 раза: 5,9 млн р. за 1 га по первому варианту и 15,9 млн р. за 1 га по второму варианту, поскольку грунтобетон более дорогой материал, чем бентонитовые маты. При этом срок службы обоих материалов при соблюдении всех требований при эксплуатации не менее 50 лет. Продолжительность реализации мероприятий 3–4 года.

Мероприятие Б – очистка подотвальных вод

В этом случае выполняется сбор подотвальных вод и их обработка на станции нейтрализации. Отечественный и мировой опыт показывает [28–39], что после нейтрализации всегда необходима доочистка путем отстаивания, так будет обеспечиваться осаждение металлов вследствие снижения скорости течения воды и увеличения времени взаимодействия загрязняющих веществ с реагентами. Этот этап может выполняться с использованием одной из двух схем: варианта Б1 – аэротенков и радиальных отстойников, варианта Б2 – отстаивание в системе, состоящей из каскада прудов. В обеих схемах после очистки происходит сброс в р. Лёвиху.

В любой из предложенных схем для перекачки подотвальных вод необходимо оборудовать насосную станцию на восточной стороне провала ш. «Лёвиха XII», в котором собираются поверхностные и подотвальные воды. Для организации работы насосной станции необходимо провести воздушную линию электропередач, наземный/подземный напорный трубопровод диаметром 146 мм. Длина трубопровода до существующей станции нейтрализации 500 м. Капитальные затраты для постройки станции перекачки подотвальных вод составят 7,5 млн р., эксплуатационные – 3,6 млн р. в год в современных ценах без НДС.

Количество гашенной извести, необходимой для нейтрализации подотвальных вод и осаждения металлов, определяется по следующей формуле [40]:

$$G = k \frac{100}{B} Q(aA + b_1C_1 + b_2C_2 + \dots + b_nC_n),$$

где k – коэффициент запаса расхода реагента по сравнению с теоретическим ($k=1,1$ для известкового молока); B – количество активной части в товарном продукте (95 %); Q – объем подотвальных вод, подлежащих нейтрализации (133 тыс. м³/год); a – расход реагента для нейтрализации, г/кг; A – содержание серной кислоты, кг/м³; $C_1, C_2, \dots, C_n$ – концентрации металлов в подотвальной воде, кг/м³; $b_1, b_2, \dots, b_n$ – концентрации реагентов, требуемых для перевода металла из растворенного состояния в осадок, кг/кг.

На основании полученных результатов расчетов (табл. 4) можно сделать вывод о необходимости использования не менее 4 тыс. т извести в год.

Таблица 4. Расчёт количества гашенной извести

Table 4. Calculation of burnt lime quantity

Компоненты/Components	Концентрации до нейтрализации C, кг/м³ Concentrations before neutralization C, kg/m³	Расход Ca(OH)₂, кг/кг Ca(OH)₂ consumption, kg/kg	Количество гашенной извести G, т/год Burnt lime quantity G, t/year
Cu	0,2	1,16	3979
Zn	0,2	1,13	
Fe	4,8	1,32	
Ni	0,001	1,26	
SO₄	25	0,76	

Капитальные затраты на строительство станции нейтрализации (строительно-монтажные, подготовительные работы и приобретение оборудования) составляет 1,6 млн р. Эксплуатационные затраты (фонд оплаты труда, налоги, расходные материалы, электроэнергия, вода и известь порошкообразная) составят 43,7 млн р./год.

Вариант Б1. Поток кислых подотвальных вод и приготовленное на станции нейтрализации известковое молоко поступают в очистное сооружение, состоящее из аэратора FUCHS OxyStar Aerators типа OS 15 (11 kW) [41] и отстойника радиального типа OPC-65 со встроенной камерой флокуляции [42]. В качестве примера может служить станция очистки шахтных вод Цшельн (Tzschelln) (Саксония, Германия) [28].

После радиального отстойника очищенная вода по самотечному трубопроводу поступает в р. Лёви-ху и далее в р. Тагил.

Итоговая эффективность очистки подотвальных вод составляет 99,9 % [43], что позволяет очистить подотвальные воды от железа, марганца и сульфата до фоновых значений для р. Тагил. Однако после всей системы очистки всё ещё будут присутствовать повышенные концентрации меди и цинка (табл. 5).

Таблица 5. Изменение концентраций загрязняющих веществ после доочистки (вариант Б1, использование аэротенков и радиального отстойника)

Table 5. Changes in concentrations of pollutants after post-treatment (option B1, use of aeration tanks and radial settling tank)

Этапы очистки Treatment steps	Загрязняющие вещества Pollutants				
	Fe	Mn	Cu	Zn	SO ₄
	Содержание, мг/л Content, mg/L				
Подотвальные воды Waste waters	4791	88	224	206	24500
Выход после аэротенков Outlet after the aerotanks	47,9	0,9	2,2	2,0	245
Выход после радиального отстойника Outlet after the radial sump	0,5	0,01	0,02	0,02	2,5
Фоновые значения р. Тагил Background values of the Tagil River	0,5	0,03	0,004	0,01	18

Капитальные затраты на приобретение аэратора и радиального отстойника составляют 10,2 млн р. Эксплуатационные затраты в основном складываются из затрат на электроэнергию и составляют 0,7 млн р./год.

Вариант Б2 подразумевает доочистку кислых вод с помощью каскада прудов-осветлителей, ниже действующего в настоящее время. В результате будет обеспечиваться осаждение металлов вследствие снижения скорости течения воды и увеличения времени взаимодействия загрязняющих веществ с реагентами.

Для оценки общей площади каскада прудов используется зависимость [44]:

$$A = \frac{Q_d(C_i - C_t)}{R_a},$$

где A – требуемая площадь пруда (м^2); Q_d – средне-суточный расход воды ($365 \text{ м}^3/\text{сут}$); C_i – концентрация загрязняющих веществ на входе, (мг/л); C_t – концентрации загрязняющих веществ при сбросе (мг/л); R_a – скорость удаления загрязняющих веществ (г/сут/м^2). Для обеспечения инженерного запаса при расчетах используются значения R_a для зимнего периода времени.

Необходимая площадь варьирует от 6,1 га (для цинка) до 31 га (для сульфата) (табл. 6, рис. 5). Водосбросы необходимо расположить в максимальном удалении друг от друга для увеличения времени отстаивания воды и эффективности прудов.

Таблица 6. Расчетные показатели площадей водоемов

Table 6. Calculated indicators of the area of water reservoirs

Компоненты Components	Концентрации, мг/л Concentration, mg/L		Скорость удаления R_a , г/сут/м ² Removal rate R_a , g/day/m ²	Требуемая площадь A , м ² Required area A , m ²
	на входе at the input C_i^*	на сбросе at the reset C_t^{**}		
Fe	2396	0,5	10	87436
Mn	47	0,03	0,22	779-8
Cu	72	0,004	0,10	262785
Zn	101	0,01	0,60	61436
SO ₄	9065	100***	10,54	310458

Примечание: *среднегодовое значение на сбросе из пруда-осветлителя; **фоновые значения концентрации в верховьях реки Тагил; ***ПДК_{рх}.

Note: *annual average value at the discharge from the clarifier pond; **background values of concentrations in the upper reaches of the Tagil river; ***MAC_{fish}.

Затраты на сооружение каскада прудов общей площадью 31 га составят 66 млн р. в современных ценах без НДС.

Приобретение аэротенков и радиального отстойника обойдется дешевле в 4 раза, чем строительство каскада прудов, при этом эксплуатационные затраты практически не отличаются. Предположительная продолжительность заполнения каскада прудов шламом составляет 50 лет.

Итоговые экономические показатели по выше-рассмотренным мероприятиям представлены на рис. 6. Затраты на рекультивацию отвала по варианту А1 составляют 133 млн р., по варианту А2 – 359 млн р. При очистке подотвальных вод по варианту Б1 капитальные затраты составят 19 млн р., а эксплуатационные затраты – 48 млн р./год, при этом по варианту Б2 капитальные затраты выше – 75 млн р., а эксплуатационные такие же – 47 млн р./год.

Для оценки экономических затрат в долгосрочной перспективе был построен график кумулятивных затрат для всех вариантов (рис. 7).

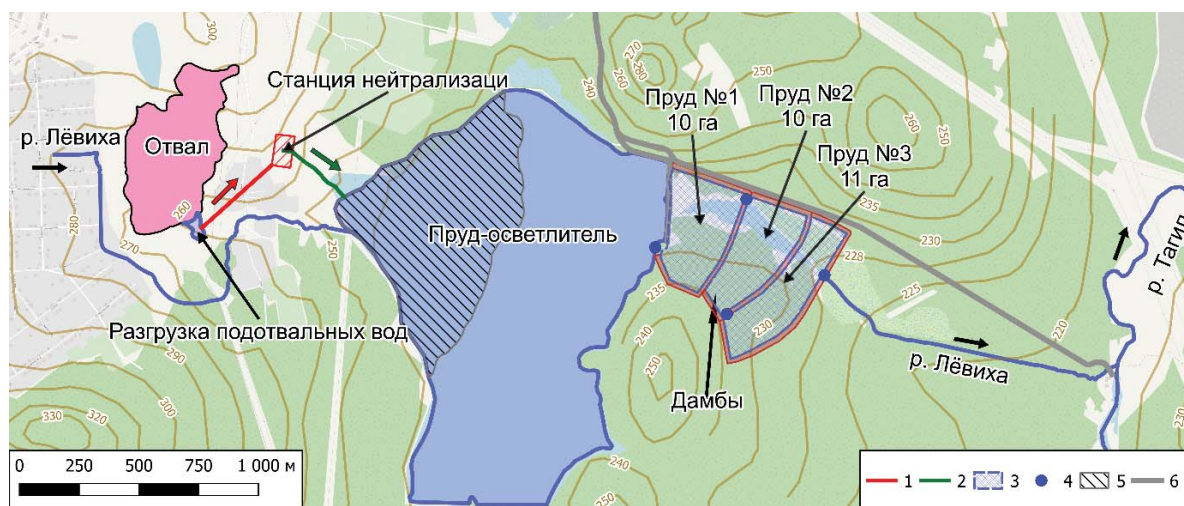


Рис. 5. Карта-схема размещения каскада прудов в долине р. Лёвихи: 1 – перекачка подотвальных вод на станцию нейтрализации; 2 – сброс нейтрализованной воды; 3 – проектируемые пруды; 4 – водосбросы; 5 – пляж пруда-осветлителя; 6 – дороги

Fig. 5. Schematic map of the ponds cascade location in the Levikha river valley: 1 – pumping of waste water to the neutralization station; 2 – neutralized water discharge; 3 – projected ponds; 4 – spillways; 5 – beach of the clarifier pond; 6 – roads



Рис. 6. Итоговые экономические показатели всех мероприятий по минимизации воздействия подотвальных вод на окружающую среду: КЗ – капитальные затраты; ЭЗ – эксплуатационные затраты, млн р.

Fig. 6. Final economic indicators of all measures to minimize the impact of waste water on the environment: КЗ (CC) – capital costs; ЭЗ (OC) – operating costs

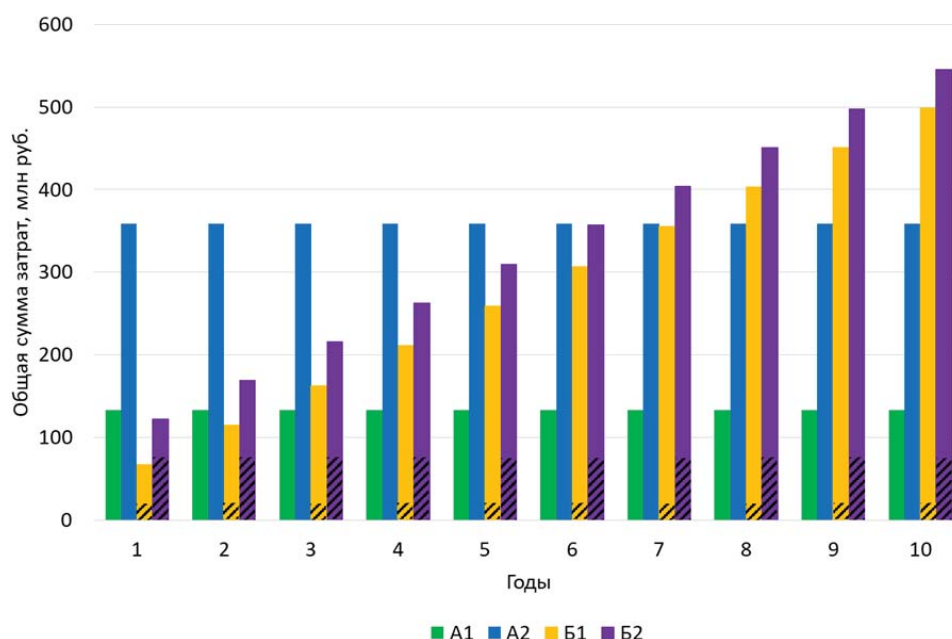


Рис. 7. Кумулятивные затраты: штриховкой выделены капитальные затраты

Fig. 7. Cumulative costs: capital expenditures are highlighted by shading

Все рассмотренные варианты с точки зрения экологии эффективны: ожидается как полное прекращение образования подотвальных вод (мероприятие А), так и их поступление в р. Лёвиху (мероприятие Б). Однако экономический аспект тоже не маловажный. Допустим ситуацию, когда были реализованы все четыре варианта. Очистка подотвальных вод (мероприятие Б) потребует меньше капитальных затрат, чем рекультивация отвала (мероприятие А). Тем не менее в первый год эксплуатации общие затраты на рекультивацию отвала не будут меняться (только капитальные), а общие затраты на очистку подотвальных вод будут увеличиваться из-за присутствия эксплуатационных затрат. И так год за годом. В отличие от очистки подотвальных вод любым рассмотренным вариантом, рекультивация отвала с использованием бентонитовых матов окажется дешевле уже на 3 год эксплуатации, а с использованием грунтобетона – на 8 год (рис. 7).

Выводы

1. Подотвальные воды сильно кислые (до $\text{pH}=1,92$) и минерализованные (от 13 до 52 г/л), состав сульфатный магниевое-алюминиево-железистый с высокими содержаниями меди (до 332200 ПДК_{рх}), цинка (до 30370 ПДК_{рх}), марганца (до 13460 ПДК_{рх}) и кобальта (до 260 ПДК_{рх}). Расход во время паводка достигает 1250 м³/сут.
2. В химическом составе пород отвала присутствуют элементы I–III класса опасности, превышающие ПДК для почв: медь (до 60 ПДК_п), цинк (до 37 ПДК_п), мышьяк (до 33 ПДК_п), кадмий (до 10 ПДК_п).
3. Ежегодно с отвала выносятся 900 т элементов, в том числе железо, алюминий, медь, цинк и марганец. Физико-химическое моделирование показало, что вынос элементов будет продолжаться ещё сотни лет. Экологический ущерб составляет более 95 млн р. в год.
4. Мероприятия по минимизации воздействия подотвальных вод на окружающую среду могут быть реализованы двумя способами: А – рекультивацией отвала; Б – очисткой подотвальных вод. По каждому способу было рассмотрено два варианта. Рекультивации отвала может быть выполнена с использованием: варианта А1 – бентонитовых матов или варианта А2 – грунтобетона. Для очистки кислых подотвальных вод была рассмотрена следующая технологическая цепочка: сбор и нейтрализация. Для доочистки возможно использование аэротенков и радиальных отстойников (вариант Б1) либо отстаивание в существующем пруду-осветлителе и в каскаде прудов (вариант Б2).
5. Затраты на рекультивацию отвала в зависимости от используемых материалов составляют (за 1 га) 5,9 млн р. при использовании бентонитовых матов и 15,9 млн р. при использовании грунтобетона. Срок их службы не менее 50 лет.
6. Капитальные затраты для очистки подотвальных вод при использовании каскада прудов в 3,9 раза выше, чем при использовании аэротенков и радиальных отстойников, а эксплуатационные практически равны.
7. Во всех вышерассмотренных вариантах мероприятий по минимизации воздействия кислых подотвальных вод на гидросферу подразумевается полное прекращение попадания кислой подотвальной воды в р. Лёвиху или же её очистку до фоновых показателей р. Тагил перед сбросом в неё. Следовательно, экологическую эффективность рассмотренных вариантов в денежном эквиваленте можно считать равной 95 млн р. в год.
8. Экономически выгодным и экологически эффективным мероприятием по минимизации воздействия кислых подотвальных вод Лёвихинского медноколчеданного рудника на гидросферу является рекультивация отвала с использованием бентонитовых матов. Это приведет к полному прекращению попадания кислых подотвальных вод в р. Лёвиху при затратах 133 млн р., срок реализации 3–4 года.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Mayes W.M., Potter H.A.B., Jarvis A.P. Inventory of aquatic contaminant flux arising from historical metal mining in England and Wales // *Science of The Total Environment*. – 2010. – Vol. 408. – P. 3576–3583. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2010.04.021.
2. Quantifying system disturbance and recovery from historical mining-derived metal contamination at Brotherswater, northwest England / D.N. Schillereff, R.C. Chiverrell, N. Macdonald, J.M. Hooke, K.E. Welsh // *J Paleolimnol*. – 2016. – Vol. 56. – P. 205–221. DOI: 10.1007/s10933-016-9907-1.
3. Geochemistry of trace metals and rare earth elements in stream water, stream sediments and acid mine drainage from Darrehzar copper mine, Kerman, Iran / N. Soltani, F. Moore, B. Keshavarzi, R. Sharifi // *Water Qual Expo Health*. – 2014. – Vol. 6. – P. 97–114. DOI: 10.1007/s12403-014-0114-x.
4. Bird G. The influence of the scale of mining activity and mine site remediation on the contamination legacy of historical metal mining activity // *Environ Sci Pollut Res*. – 2016. – Vol. 23. – P. 23456–23466. DOI: 10.1007/s11356-016-7400-z.
5. Assessment of soil and water contamination at the Tab-Simco coal mine: a case study / A. RoyChowdhury, D. Sarkar, Y. Deng, R. Datta // *Mine Water Environ*. – 2017. – Vol. 36. – P. 248–254. DOI: 10.1007/s10230-016-0401-9.
6. Temporal fluctuations in water contamination from abandoned pyrite Wisciszowice mine (Western Sudetes, Poland) / M.R. Costa, H. Marszalek, E.F. da Silva, A. Mickiewicz, M. Wasik, C. Candeias // *Environ Geochem Health*. – 2021. – Vol. 43. – P. 3115–3132. DOI: 10.1007/s10653-021-00809-1.

7. Molenda T., Kidawa J. Natural and anthropogenic conditions of the chemical composition of pit lake waters (based on example pit lakes from central Europe) // *Mine Water Environ.* – 2020. – Vol. 39. – P. 473–480. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10230-020-00660-3>.
8. Федеральный закон от 10 января 2002 г. N 7-ФЗ «Об охране окружающей среды» (с изменениями на 8 августа 2024 года). Принят Государственной Думой 20 декабря 2001 года.
9. Техногенные месторождения Урала и оценка их воздействия на окружающую среду / С.И. Мормиль, В.И. Сальников, Л.А. Амосов, Г.Г. Хасанова, А.И. Семячков, Б.Б. Зобнин, А.В. Бурмистренко / под ред. Ю.А. Боровкова. – Екатеринбург: НИИ-Природа, ДПР по Уральскому региону, ВНИИЗАРУБЕЖГЕОЛОГИЯ, 2002. – 206 с.
10. Рыбникова Л.С., Рыбников П.А., Наволокина В.Ю. Снижение негативного влияния законсервированного медноколчеданного рудника Урала на состояние гидросферы // *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых.* – 2022. – № 3. – С. 194–201. DOI: 10.15372/FTPRPI20220318.
11. Nordstrom D., Blowes D.W., Ptacek C.J. Hydrogeochemistry and microbiology of mine drainage: an update // *Applied Geochemistry.* – 2015. – Vol. 57. – P. 3–16. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2015.02.008>.
12. Рыбникова Л.С., Рыбников П.А. Закономерности формирования качества подземных вод на отработанных медноколчеданных рудниках Левихинского рудного поля (Средний Урал, Россия) // *Геохимия.* – 2019. – Т. 64. – № 3. – С. 282–299. DOI: 10.31857/S0016-7525643282-299.
13. Емлин Э.Ф. Техногенез колчеданных месторождений Урала. – Свердловск: Изд-во УрГУ, 1991. – 256 с.
14. Алексеев В.А. Причины образования кислых дренажных вод в отвалах сульфидсодержащих пород // *Геохимия.* – 2022. – Т. 67. – № 1. – С. 69–83. DOI: 10.31857/S0016752522010022.
15. Effect of ore mineralogy and bedrock lithology on metal loading rates and acid-mine drainage: Bayhorse creek, Idaho and the North Fork of the American Fork River, Utah / T.E. Lachmar, H.L. McDonough, N.I. Burk, P.T. Kolesar // *Mine Water Environ.* – 2019. – Vol. 38. – P. 3–15. DOI: 10.1007/s10230-018-00574-1.
16. ГОСТ 17.4.4.02-2017. Охрана природы. Почвы. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического, гельминтологического анализа. – М.: Стандартинформ, 2017. – 12 с.
17. ГОСТ Р 59024-2020. Вода. Общие требования к отбору проб. – М.: Стандартинформ, 2020. – 57 с.
18. Нормативы качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативы предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения. – М.: Изд-во ВНИРО, 2011. – 257 с.
19. СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания: введён в действие с постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 28 января 2021 года N 2.
20. Методики исчисления размера вреда, причиненного водным объектам вследствие нарушения водного законодательства. – М.: Министерство природных ресурсов, 2009. – 41 с.
21. Rybnikov P.A., Rybnikova L.S. Formation of waste-rock drainage water on massive sulfide deposits of the Urals (Russia) // *Procedia Earth and Planetary Science.* – 2017. – Vol. 17. – P. 857–860. DOI: 10.1016/j.proeps.2017.01.038.
22. Рекультивация породного отвала ОАО Шахта «Капитальная» Кемеровской области / А.Е. Некрасова, Е.Г. Бобренко, А.И. Кныш, В.И. Сологаев // *Вестник ОмГАУ.* – 2016. – Т. 21. – № 1. – С. 154–160.
23. Шелканов Н.С., Овешников Ю.М., Субботин Ю.В. Рекультивация отвалов вскрышных пород на угольных разрезах Забайкальского края // *Вестник ЗабГУ.* – 2012. – Т. 18. – № 11. – С. 28–33.
24. Способ рекультивации хвостохранилищ: пат. № 2643038, Российская Федерация, С1; заявл. 13.06.2017; опубл. 30.01.2018, Бюл. № 4. – 12 с.
25. Ульрих Д.В. Научное обоснование и разработка технологий комплексного восстановления техногенно-нарушенных территорий в районах добычи и переработки медных руд: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – М., 2020. – 44 с.
26. ООО «БентИзол». URL: <https://bentizol.ru/> (дата обращения: 17.03.2024).
27. Компания «Геотех». URL: <https://www.geotx.ru/> (дата обращения: 17.03.2024).
28. FUCHS Mine Water Treatment. Case Studies, 2021. URL: https://www.fuchswater.com/wp-content/uploads/2021/01/FUCHS_Mine_Water_Treatment_Case_Studies_2021-01.pdf (дата обращения 16.03.2024).
29. Информационное агентство «URA.RU». URL: <https://ura.news/news/1052441120> (дата обращения 16.03.2024).
30. Karaca O., Cameselle C., Reddy K.R. Acid pond sediment and mine tailings contaminated with metals: physicochemical characterization and electrokinetic remediation // *Environ Earth Sci.* – 2017. – Vol. 76. – № 408. DOI: 10.1007/s12665-017-6736-0.
31. Sandhya B., Tarun K.B. Phytoremediation of the coalmine effluent // *Ecotoxicology and Environmental Safety.* – 2012. – Vol. 81. – P. 36–42. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2012.04.009.
32. RoyChowdhury A., Sarkar D., Datta R. Removal of acidity and metals from acid mine drainage-impacted water using industrial byproducts // *Environmental Management.* – 2019. – Vol. 63. – P. 148–158. DOI: 10.1007/s00267-018-1112-8.
33. Choi H.J. Biosorption of heavy metals from acid mine drainage by modified sericite and microalgae hybrid system // *Water Air Soil Pollut.* – 2015. – Vol. 226. – № 185. DOI: 10.1007/s11270-015-2433-3.
34. Etale A., Tutu H., Drake D.C. Application of maghemite nanoparticles as sorbents for the removal of Cu(II), Mn(II) and U(VI) ions from aqueous solution in acid mine drainage conditions // *Applied Water Sci.* – 2016. – Vol. 6. – P. 187–197. DOI: 10.1007/s13201-014-0217-3.
35. RoyChowdhury A., Sarkar D., Datta R. Remediation of acid mine drainage-impacted water // *Curr Pollution Rep.* – 2015. – Vol. 1. – P. 131–141. DOI: 10.1007/s40726-015-0011-3.
36. Bioaccumulation for heavy metal removal: a review / N.D. Nnaji, H. Onyeaka, T. Miri, C. Ugwa // *SN Appl. Sci.* – 2023. – Vol. 5. – № 125. DOI: 10.1007/s42452-023-05351-6.
37. Формирование шахтных вод и анализ способов их очистки / А.А. Куликова, Ю.А. Сергеева, Т.И. Овчинникова, Е.И. Хабарова // *ГИАБ.* – 2020. – № 7. – С. 135–145. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-7-0-135-145.

38. Geochemical behaviour of rare earth elements throughout an acid mine drainage passive treatment system in the Lousal mine area, Portugal / C. Obregon-Castro, M.I. Prudencio, C. Diamantino, E. Carvalho, D. Russo, R. Marques // *Mine Water Environ.* – 2023. – Vol. 42. – P. 533–545. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10230-023-00954-2>.
39. Nordstrom D. Geochemical modeling of iron and aluminum precipitation during mixing and neutralization of acid mine drainage // *Minerals*. – 2020. – Vol. 10. – № 547. DOI: <https://doi.org/10.3390/min10060547>.
40. Филиппов В.Н., Зиновьев А.П., Рыжов Г.И. Оборудование и технология очистки сточных вод, примеры расчета. – Уфа: Уфим. гос. нефтяной техн. ун-т, 2003. – 299 с.
41. FUCHS OxyStar Aerator Brochure EN 2020-11. URL: https://www.fuchswater.com/wp-content/uploads/2021/01/FUCHS_OxyStar_Aerator_Brochure_EN_2020-11.pdf (дата обращения 16.03.2024).
42. НПО ЭКОСИСТЕМА. Отстойник радиальный высокой производительности для очистки сточных вод – ОРСВ. URL: https://eco-systema.com/productions/modules/Otstoynik_ORSV/ (дата обращения 16.03.2024).
43. Долина Л.Ф. Современная техника и технологии для очистки сточных вод от солей тяжелых металлов. – Днепропетровск: Континент, 2008. – 255 с.
44. PIRAMID Consortium. Engineering guidelines for the passive remediation of acidic and/or metalliferous mine drainage and similar wastewaters. European Commission 5th Framework RTD Project no. EVK1-CT-1999-000021 "Passive in-situ remediation of acidic mine/industrial drainage" (PIRAMID). – Newcastle Upon Tyne UK: University of Newcastle Upon Tyne, 2003. – 166 p.

Информация об авторах

Людмила Сергеевна Рыбникова, доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник лаборатории экологии горного производства, Институт горного дела УрО РАН, Россия, 620219, г. Екатеринбург, ул. Мамина-Сибиряка, 58; luserib@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4221-7879>

Пётр Андреевич Рыбников, кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией геоинформационных и цифровых технологий в недропользовании, Институт горного дела УрО РАН, 620219, г. Екатеринбург, ул. Мамина-Сибиряка, 58; ribnikoff@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7829-5035>

Айнур Нафисович Галин, младший научный сотрудник лаборатории геоинформационных и цифровых технологий в недропользовании, Институт горного дела УрО РАН, Россия, 620219, г. Екатеринбург, ул. Мамина-Сибиряка, 58; aunur.galin.1997@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7090-0379>

Поступила в редакцию: 25.12.2023

Поступила после рецензирования: 02.05.2024

Принята к публикации: 24.01.2025

REFERENCES

1. Mayes W.M., Potter H.A.B., Jarvis A.P. Inventory of aquatic contaminant flux arising from historical metal mining in England and Wales. *Science of The Total Environment*, 2010, vol. 408, pp. 3576–3583. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2010.04.021.
2. Schillereff D.N., Chiverrell R.C., Macdonald N., Hooke J.M., Welsh K.E. Quantifying system disturbance and recovery from historical mining-derived metal contamination at Brotherswater, northwest England. *J Paleolimnol*, 2016, vol. 56, pp. 205–221. DOI: 10.1007/s10933-016-9907-1.
3. Soltani N., Moore F., Keshavarzi B., Sharifi R. Geochemistry of trace metals and rare earth elements in stream water, stream sediments and acid mine drainage from Darrehzar copper mine, Kerman, Iran. *Water Qual Expo Health*, 2014, vol. 6, pp. 97–114. DOI: 10.1007/s12403-014-0114-x.
4. Bird G. The influence of the scale of mining activity and mine site remediation on the contamination legacy of historical metal mining activity. *Environ Sci Pollut Res*, 2016, vol. 23, pp. 23456–23466. DOI: 10.1007/s11356-016-7400-z.
5. RoyChowdhury A., Sarkar D., Deng Y., Datta R. Assessment of soil and water contamination at the Tab-Simco coal mine: a case study. *Mine Water Environ*, 2017, vol. 36, pp. 248–254. DOI: 10.1007/s10230-016-0401-9.
6. Costa M.R., Marszałek H., Da Silva E.F., Mickiewicz A., Wasik M., Candeias C. Temporal fluctuations in water contamination from abandoned pyrite Wisciszowice mine (Western Sudetes, Poland). *Environ Geochem Health*, 2021, vol. 43, pp. 3115–3132. DOI: 10.1007/s10653-021-00809-1.
7. Molenda T., Kidawa J. Natural and anthropogenic conditions of the chemical composition of pit lake waters (based on example pit lakes from central Europe). *Mine Water Environ*, 2020, vol. 39, pp. 473–480. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10230-020-00660-3>.
8. *Federal Law of January 10, 2002 N 7-FL «On Environmental Protection» (as amended on August 8, 2024)*. Adopted by the State Duma on December 20, 2001.
9. Mornil S.I., Salnikov V.I., Amosov L.A., Khasanova G.G., Semyachkov A.I., Zobnin B.B., Burmistrenko A.V. *Technogenic deposits of the Urals and assessment of their impact on the environment*. Ekaterinburg, NIA-Priroda, DPR for the Ural Region, VNIIZARUBEZHGEOLGIA Publ., 2002. 206 p. (In Russ.)
10. Rybnikova L.S., Rybnikov P.A., Navolokina V.Yu. Reduction of the negative impact of the mothballed copper-coal mine of the Urals on the state of the hydrosphere. *Physico-technical problems of mineral resources development*, 2022, no. 3, pp. 194–201. (In Russ.) DOI: 10.15372/FTPRPI20220318.
11. Nordstrom D., Blowes D.W., Ptacek C.J. Hydrogeochemistry and microbiology of mine drainage: an update. *Applied Geochemistry*, 2015, vol. 57, pp. 3–16. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2015.02.008>.

12. Rybnikova L.S., Rybnikov P.A. Regularities of groundwater quality formation at the worked-out copper-coal mines of the Levikha ore field (Middle Urals, Russia). *Geochemistry*, 2019, vol. 64, no. 3, pp. 282–299. (In Russ.) DOI: 10.31857/S0016-7525643282-299.
13. Emlin E.F. *Technogenesis of the Ural's sinter deposits*. Sverdlovsk, UrSU Publ., 1991. 256 p. (In Russ.)
14. Alexeev V.A. Causes of acid drainage water formation in the dumps of sulfide-bearing rocks. *Geochemistry*, 2022, vol. 67, no. 1, pp. 69–83. (In Russ.) DOI: 10.31857/S0016752522010022.
15. Lachmar T.E., McDonough H.L., Burk N.I., Kolesar P.T. Effect of ore mineralogy and bedrock lithology on metal loading rates and acid-mine drainage: Bayhorse creek, Idaho and the North Fork of the American Fork River, Utah. *Mine Water Environ*, 2019, vol. 38, pp. 3–15. DOI: 10.1007/s10230-018-00574-1.
16. SS 17.4.4.02-2017. *Nature conservation. Soils. Methods of sampling and preparation of samples for chemical, bacteriological, helminthological analysis*. Moscow, Standardinform Publ., 2017. 12 p. (In Russ.)
17. SS P 59024-2020. *Water. General requirements for sampling*. Moscow, Standardinform Publ., 2020. 57 p. (In Russ.)
18. *Norms of water quality of water bodies of fishery significance, including norms of maximum permissible concentrations of harmful substances in the waters of water bodies of fishery significance*. Moscow, VNIRO Publ., 2011. 257 p. (In Russ.)
19. SanPiN 1.2.3685-21. *Hygienic norms and requirements to ensure the safety and (or) harmlessness to humans of habitat factors: enacted by the Decree of the Chief State Sanitary Doctor of the Russian Federation on January 28, 2021. no. 2*. (In Russ.)
20. *Methodologies for calculating the amount of damage caused to water bodies due to violation of water legislation*. Moscow, Ministry of Natural Resources Publ., 2009. 41 p. (In Russ.)
21. Rybnikov P.A., Rybnikova L.S. Formation of waste-rock drainage water on massive sulfide deposits of the Urals (Russia). *Procedia Earth and Planetary Science*, 2017, vol. 17, pp. 857–860. DOI: 10.1016/j.proeps.2017.01.038.
22. Nekrasova A.E., Bobrenko E.G., Knysh A.I., Sologayev V.I. Recultivation of the rock dump of JSC Mine "Kapitalnaya" Kemerovo region. *Vestnik OmGAU*, 2016, vol. 21, no. 1, pp. 154–160. (In Russ.)
23. Schelkanov N.S., Oveshnikov Yu.M., Subbotin Yu.V. Recultivation of overburden dumps at coal mines of Zabaikalsky Krai. *Vestnik ZabGU*, 2012, vol. 18, no. 11, pp. 28–33. (In Russ.)
24. Pashkevich M.A., Smirnov Y.D., Kremcheev E.A., Nagornov D.O., Afanasiadi. *Method of reclamation of tailing dumps*. Patent RF, no. 2643038, 2018. (In Russ.)
25. Ulrich D.V. *Scientific substantiation and development of technologies for integrated restoration of technogenically disturbed territories in the areas of mining and processing of copper ores*. Dr. Diss. Abstract. Moscow, 2020. 44 p.
26. «BentIsol» LLC. Available at: <https://bentisol.ru/> (accessed 17 March 2024).
27. «Geotech» Company. Available at: <https://www.geotx.ru/> (accessed 17 March 2024).
28. FUCHS Mine Water Treatment. *Case Studies*, 2021. Available at: https://www.fuchswater.com/wp-content/uploads/2021/01/FUCHS_Mine_Water_Treatment_Case_Studies_2021-01.pdf (accessed 16 March 2024).
29. «URA.RU» News Agency. Available at: <https://ura.news/news/1052441120> (accessed 16 March 2024).
30. Karaca O., Cameselle C., Reddy K.R. Acid pond sediment and mine tailings contaminated with metals: physicochemical characterization and electrokinetic remediation. *Environ Earth Sci*, 2017, vol. 76, no. 408. DOI: 10.1007/s12665-017-6736-0.
31. Sandhya B., Tarun K.B. Phytoremediation of the coalmine effluent. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2012, vol. 81, pp. 36–42. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2012.04.009.
32. RoyChowdhury A., Sarkar D., Datta R. Removal of acidity and metals from acid mine drainage-impacted water using industrial byproducts. *Environmental Management*, 2019, vol. 63, pp. 148–158. DOI: 10.1007/s00267-018-1112-8.
33. Choi H.J. Biosorption of heavy metals from acid mine drainage by modified sericite and microalgae hybrid system. *Water Air Soil Pollut*, 2015, vol. 226, no. 185. DOI: 10.1007/s11270-015-2433-3.
34. Etale A., Tutu H., Drake D.C. Application of maghemite nanoparticles as sorbents for the removal of Cu(II), Mn(II) and U(VI) ions from aqueous solution in acid mine drainage conditions. *Applied Water Sci*, 2016, vol. 6, pp. 187–197. DOI: 10.1007/s13201-014-0217-3.
35. RoyChowdhury A., Sarkar D., Datta R. Remediation of acid mine drainage-impacted water. *Curr Pollution Rep*, 2015, vol. 1, pp. 131–141. DOI: 10.1007/s40726-015-0011-3.
36. Nnaji N.D., Onyeaka H., Miri T., Ugwa C. Bioaccumulation for heavy metal removal: a review. *SN Appl. Sci*, 2023, vol. 5, no. 125. DOI: 10.1007/s42452-023-05351-6.
37. Kulikova A.A., Sergeeva Yu.A., Ovchinnikova T.I., Khabarova E.I. Formation of mine waters and analysis of methods of their treatment. *GIAB*, 2020, no. 7, pp. 135–145. (In Russ.) DOI: 10.25018/0236-1493-2020-7-0-135-145.
38. Obregon-Castro C., Prudencio M.I., Diamantino C., Carvalho E., Russo D., Marques R. Geochemical behaviour of rare earth elements throughout an acid mine drainage passive treatment system in the Lousal mine area, Portugal. *Mine Water Environ*, 2023, vol. 42, pp. 533–545. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10230-023-00954-2>.
39. Nordstrom D. Geochemical modeling of iron and aluminum precipitation during mixing and neutralization of acid mine drainage. *Minerals*, 2020, vol. 10, no. 547. DOI: <https://doi.org/10.3390/min10060547>.
40. Filippov V.N., Zinoviev A.P., Ryzhov G.I. *Equipment and technology of wastewater treatment, calculation examples*. Ufa, Ufa State Petroleum Technical University Publ., 2003. 299 p. (In Russ.)
41. FUCHS OxyStar Aerator Brochure EN 2020-11. Available at: https://www.fuchswater.com/wp-content/uploads/2021/01/FUCHS_OxyStar_Aerator_Brochure_EN_2020-11.pdf (accessed 16 March 2024).
42. NPO ECOSYSTEM. *High capacity radial settling tank for wastewater treatment – OPCW*. (In Russ.) Available at: https://ecosystema.com/productions/modules/Otstoynik_ORSV/ (accessed 16 March 2024).
43. Dolina L.F. *Modern techniques and technologies for wastewater treatment from heavy metal salts*. Dnepropetrovsk, Continent Publ., 2008. 255 p. (In Russ.)
44. PIRAMID Consortium. *Engineering guidelines for the passive remediation of acidic and/or metalliferous mine drainage and similar wastewaters. European Commission 5th Framework RTD Project no. EVK1-CT-1999-000021 "Passive in-situ remediation of acidic mine/industrial drainage" (PIRAMID)*. Newcastle Upon Tyne UK, University of Newcastle Upon Tyne, 2003. 166 p.

Information about the authors

Liudmila S. Rybnikova, Dr. Sc., Chief Scientific Associate, Institute of Mining UB RAS, 58, Mamin-Sibiryak street, Ekaterinburg, 620219, Russian Federation; luserib@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4221-7879>

Petr A. Rybnikov, Cand. Sc., Leading Researcher, Head of Laboratory of Geoinformation and Digital Technologies in Subsoil Use, Institute of Mining UB RAS, 58, Mamin-Sibiryak street, Ekaterinburg, 620219, Russian Federation; ribnikoff@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7829-5035>

Aynur N. Galin, Junior Researcher, Institute of Mining UB RAS, 58, Mamin-Sibiryak street, Ekaterinburg, 620219, Russian Federation; aynur.galin.1997@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7090-0379>

Received: 25.12.2023

Revised: 02.05.2024

Accepted: 24.01.2025

УДК 665.613+617:547.83
DOI: 10.18799/24131830/2025/2/4660
Шифр специальности ВАК: 1.4.12

Структурно-групповой состав и коллоидная стабильность синтетических асфальтеноподобных азотистых оснований

Д.С. Корнеев✉

Югорский государственный университет, Россия, г. Ханты-Мансийск

✉korneevds90@mail.ru

Аннотация. Актуальность работы обусловлена необходимостью установления селективного влияния отдельных параметров структуры и гетероатомных функциональных групп в структуре асфальтеновых молекул на процессы их агрегации для разработки эффективных способов предотвращения осадкообразования в технологическом оборудовании на стадиях добычи, транспорта и переработки тяжелого углеводородного сырья. **Цель:** установить влияние структурно-группового состава, концентрации основного азота в асфальтеновых веществах на их коллоидную стабильность. **Объекты:** тяжелая нефть Республики Татарстан (плотность при 20 °С – 940,0 кг/м³; вязкость при 20 °С – 742,9 сСт), модельные нефтяные системы с содержанием основного азота 1, 2, 3 мас. %, асфальтены исходной и модельных нефтяных систем и продуктов их термоллиза. **Методы:** жидкостная адсорбционная хроматография, потенциометрическое титрование, элементный анализ, криоскопия в нафталине, спектроскопия ЯМР ¹H, структурно-групповой анализ, спектрофотометрия в видимой области. **Результаты.** Получены синтетические асфальтеноподобные азотистые основания посредством термоллиза модельных нефтяных систем с различным содержанием основного азота (хинолина) при температуре 400 °С в течение 4 часов. В процессе термоллиза модельных нефтяных систем в молекулярную структуру синтетических асфальтеноподобных веществ дополнительно встраивается 0,3–0,8 мас. % основного азота. Молекулярная масса синтетических асфальтеноподобных веществ в два раза ниже относительно асфальтенов исходной нефти. С увеличением в синтетических асфальтеноподобных веществах основного азота возрастает фактор ароматичности на 2–3 % со снижением доли парафинового углерода. Установлено, что асфальтены из термически преобразованной нефти в два раза более устойчивы к седиментации по сравнению с исходными асфальтенами, в связи с двукратным снижением их средней молекулярной массы. Показано, что скорость седиментации синтетических асфальтеноподобных азотистых оснований в два–три раза ниже по сравнению с исходными асфальтенами. Установлено, что коллоидная стабильность синтетических асфальтеноподобных веществ повышается с увеличением в их молекулярной структуре содержания N_{осн}.

Ключевые слова: тяжелая нефть, термоллиз, асфальтены, азотистые основания, состав, структура, агрегация

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках проекта № 22-73-00302.

Для цитирования: Корнеев Д.С. Структурно-групповой состав и коллоидная стабильность синтетических асфальтеноподобных азотистых оснований // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 2. – С. 116–125. DOI: 10.18799/24131830/2025/2/4660

UDC 665.613+617:547.83
DOI: 10.18799/24131830/2025/2/4660

Structural-group composition and colloidal stability of synthetic asphalten-like nitrogen bases

D.S. Korneev✉

Yugra State University, Khanty-Mansiysk, Russian Federation

✉korneevds90@mail.ru

Abstract. Relevance. The need to establish the selective impact of individual structural parameters and heteroatomic functional groups in the structure of asphaltene molecules on their aggregation in order to develop effective ways to prevent sedimentation in technological equipment at the stages of production, transport and processing of heavy hydrocarbon raw materials. **Aim.** To establish the impact of the structural group composition, the concentration of basic nitrogen in asphaltene substances on their colloidal stability. **Objects.** Heavy oil of the Republic of Tatarstan (density at 20°C – 940,0 kg/m³; viscosity at 20°C – 742,9 cSt), model oil systems with a basic nitrogen content of 1, 2, 3 wt %, asphaltenes initial and model petroleum systems and their thermolysis products. **Methods.** Liquid adsorption chromatography, potentiometric titration, elemental analysis, cryoscopy in naphthalene, ¹H NMR spectroscopy, structural group analysis, spectrophotometry. **Results.** Synthetic asphaltene-like nitrogenous bases were obtained by thermolysis of model petroleum systems with different contents of basic nitrogen (quinoline) at 400°C for 4 hours. During thermolysis, 0.3–0.8 wt % of basic nitrogen is additionally incorporated into the molecular structure of synthetic asphaltene-like substances. The molecular weight of synthetic asphaltene-like substances is two times lower than that of the asphaltenes of the initial oil. With an increase in basic nitrogen in synthetic asphaltene-like substances, the aromaticity factor increases by 2–3% with a decrease in the proportion of paraffin carbon. It was established that asphaltenes from thermally converted oil are two times more resistant to sedimentation compared to the initial asphaltenes, due to a twofold decrease in their average molecular weight. It was shown that the sedimentation rate of synthetic asphaltene-like nitrogenous bases is two–three times lower compared to the initial asphaltenes. It was established that the colloidal stability of synthetic asphaltene-like substances increases with the growth in N_{bas} content in their molecular structure.

Keywords: heavy oil, thermolysis, asphaltenes, nitrogenous bases, composition, structure, aggregation

Acknowledgements: The research was financially supported by the Russian Science Foundation within the project no. 22-73-00302.

For citation: Korneev D.S. Structural-group composition and colloidal stability of synthetic asphaltene-like nitrogen bases. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 1, pp. 116–125. DOI: 10.18799/24131830/2025/2/4660

Введение

По мере сокращения запасов легких нефтей и истощения существующих месторождений возникает необходимость интенсификации добычи нефти различными методами [1, 2]. Однако это не всегда эффективно и экономически оправдано [2], в связи с чем пополнение запасов углеводородного сырья происходит за счет ежегодного увеличения добычи и переработки тяжелых нефтей и природных битумов с высоким содержанием асфальтенов. [3]. Асфальтены – наиболее полярные и высокомолекулярные компоненты нефти, содержащие большое количество гетероатомов и металлов, что создает проблемы при добыче, транспортировке и переработке тяжелого углеводородного сырья [4, 5]. Асфальтены представляют собой фракцию, нерастворимую в n-алканах, но растворимую в ароматических растворителях (бензоле, толуоле), однако молекулярная структура асфальтенов весьма сложна и разнообразна [6–8]. Приняты две модели молекулярного строения асфальтенов: «остров» (континент) и «архипелаг». «Континентальная» модель асфальтенов представляет собой одно большое полициклическое ядро (4–6 колец), обрамленное короткими алкильными заместителями [9]. «Архипелаговая» модель асфальтенов подразумевает наличие нескольких полициклических систем из 2–4 колец, соединенных длинными алифатическими цепями и гетероатомными мостиками [10, 11]. Особенности химического состава и сложное строение асфальтенов определяют их склон-

ность к самоассоциации [12]. Молекулы асфальтенов образуют супрамолекулярные структуры различного уровня (димеры, наноагрегаты, кластеры) в зависимости от внешних термобарических условий, состава дисперсионной среды и т. д. [12–14]. Крупные агрегаты асфальтенов создают проблемы при добыче тяжелых нефтей, связанные с увеличением вязкости флюида, закупориванием породы-коллектора, образованием осадка в технологическом оборудовании [15–17]. Образование асфальтеносодержащих отложений является важнейшей нерешенной проблемой добычи и транспорта нефти [18, 19]. Для предотвращения осложнений нефтедобычи необходимо точное описание супрамолекулярной сборки асфальтенов. Однако механизм агрегации и седиментации асфальтенов до сих пор недостаточно изучен [20]. Считается, что основной силой агрегации асфальтенов являются стэкинг-взаимодействия между ароматическими ядрами с образованием слоистых пачек [21]. Также значительное внимание уделяется силам Ван-дер-Ваальса, которые способствуют ассоциации асфальтенов за счет взаимодействия алифатических боковых цепей [22, 23]. В последние годы при описании супрамолекулярной сборки асфальтенов стали учитываться кислотно-основные взаимодействия, водородные связи, комплексы металлов и т. д. [24]. Показано, что образование агрегатов асфальтенов в растворах происходит с участием ароматических фрагментов и сульфоксидных, эфирных групп, пиридиновых и пиррольных колец [25].

Однако трудно установить роль различных гетероатомных фрагментов в сложных процессах образования агрегатов и кластеров асфальтенов. В связи с этим весьма актуальными являются исследования механизмов агрегации асфальтенов [26, 27] и устойчивости нефтяных дисперсных систем [28, 29]. В последнее время большое внимание уделяется роли гетероатомов (N, S, O) в процессах самосборки асфальтенов [30, 31]. Показано, что функциональные группы могут существенно изменять пространственную структуру асфальтенов, а также влиять на их агрегацию [31–33]. Однако данный вопрос до сих пор неоднозначен и противоречив [34]. Так, в ряде работ утверждалось, что молекулы асфальтенов с гетероатомными функциональными группами проявляют более высокую склонность к самоассоциации. При этом природа гетероэлемента и его положение в макромолекуле влияют на механизм сборки агрегатов [35–37]. Другие исследования показали, что наличие гетероатомов в молекулярной структуре асфальтенов не играет существенной роли в их супрамолекулярной сборке [38, 39]. Противоречия отчасти связаны с тем, что результаты исследований обычно получают с помощью теоретических расчетов методами молекулярной динамики и теории функционала плотности на различных экспериментальных моделях. Поэтому для понимания реальной роли гетероатомных фрагментов в процессах агрегации асфальтенов необходимы дополнительные исследования с использованием методов лабораторного моделирования.

Одним из факторов, влияющих на агрегацию асфальтенов, является химическая природа азотистых гетероциклических структур, склонных к межмолекулярным взаимодействиям из-за наличия сопряженных ароматических систем, а также неподеленной пары электронов атомов азота. Такие соединения представлены в нефти гомологами пиридина, хинолина, бензо- и дибензохинолинов [40, 41]. Известно, что высокомолекулярные азотистые основания присутствуют в смолисто-асфальтеновых веществах, влияют на состав нефти и структуру асфальтеновых агрегатов. Так, азотистые основания, выделенные из нефтяных смол и добавленные в тяжелую нефть, способствуют увеличению содержания асфальтенов, супрамолекулярная структура которых становится более рыхлой и неупорядоченной [42, 43]. Однако изученные азотистые основания смол содержат также функциональные группы с атомами S и O, которые могут участвовать в процессах агрегации. В связи с этим сложно сделать достоверный вывод о влиянии «чистых» азотистых оснований на агрегацию асфальтенов. При этом остается неясным вклад пиридиновых структурных фрагментов асфальтенов в ме-

ханизм их супрамолекулярной сборки. Таким образом, крайне важно оценить влияние концентрации основных азоторганических фрагментов в структуре асфальтенов на процесс формирования и поведения их супрамолекулярных образований.

Цель работы – установить влияние структурно-группового состава, концентрации основного азота в асфальтеновых веществах на их коллоидную стабильность.

Экспериментальная часть

Объектами исследования были тяжелая нефть Республики Татарстан (плотность при 20 °С – 940,0 кг/м³; вязкость при 20 °С – 742,9 сСт) и модельные нефтяные системы, полученные смешением исходной нефти и хинолина (Sigma-Aldrich, чистота 98,9 %). Соотношение нефти и хинолина подбиралось таким, чтобы расчетное содержание азота в модельных смесях составляло 1, 2, 3 мас. % (табл. 1). Полученные смеси гомогенизировались с помощью магнитной мешалки при температуре 40 °С в течение 8 часов. Также объектами исследования являлись асфальтены, выделенные из модельных нефтяных систем и продуктов их термолитического разложения.

Таблица 1. Описание нефтяных систем

Table 1. Description of petroleum systems

Объект/Object	Обозначение Abbreviation	Содержание азота, мас. % Nitrogen content, wt %
Исходная нефть/Initial crude oil	H ₀ /O ₀	0,4
Модельная нефтяная система 1 Model petroleum system 1	H ₁ /O ₁	1,0
Модельная нефтяная система 2 Model petroleum system 2	H ₂ /O ₂	2,0
Модельная нефтяная система 3 Model petroleum system 3	H ₃ /O ₃	3,0

Химический состав исходной нефти приведен в табл. 2. Нефть характеризуется высоким содержанием смол и асфальтенов (около 35 мас. %). Общее содержание гетероатомов в нефти также велико – 5,95 %, однако содержание азота умеренное и составляет 0,4 мас. %. В связи с этим данная нефть была выбрана в качестве сырья для приготовления модельных нефтяных систем для последующего термолитического синтеза асфальтеноподобных азотистых оснований.

Определение вещественного состава исходной нефти проводилось по стандартной методике путем добавления к навеске образца (3 г) *n*-гексана в 40-кратном массовом избытке для осаждения асфальтенов. Далее раствор фильтровался, после чего асфальтеновый осадок очищался *n*-гексаном от мальтенов в аппарате Сокслета в течение 18 часов и су-

шился до постоянной массы. Мальтены разделялись на масла и смолы методом жидкостной адсорбционной хроматографии на силикагеле (АСКГ фр. 0,2–0,5 мм). Масла элюировались *n*-гексаном, смолы – смесью этанол-бензол в соотношении 1:1, после чего образцы сушились до постоянного веса.

Таблица 2. Химический состав исходной нефти

Table 2. Chemical composition of initial oil

Элементный состав Elemental composition					Вещественный состав Group composition		
мас. %/wt %							
С	Н	N	S	O	Масла Hydrocarbons	Смолы Resins	Асфальтены Asphaltenes
81.67	12.38	0.41	4.01	1.53	64.7	24.0	11.3

Исходная и модельные нефтяные системы подвергались термолизу с целью получения асфальтоподобных веществ с различным содержанием основного азота ($N_{\text{осн}}$). Предполагалось, что в процессе термолиза молекулы хинолина и высокомолекулярных соединений нефтяных систем будут взаимодействовать по радикально-цепному механизму с образованием асфальтоподобных компонентов, обогащенных $N_{\text{осн}}$. Термолиз исходной и модельных нефтяных систем проводился при температуре 380–400 °С в течение 4 часов. Выбор температуры термолиза основан на результатах предварительных экспериментов, которые показали, что до 380 °С вещественный состав нефтяных систем изменяется незначительно в связи с низкой конверсией компонентов нефтяных систем в данных условиях. Схема установки термолиза представлена на рис. 1.

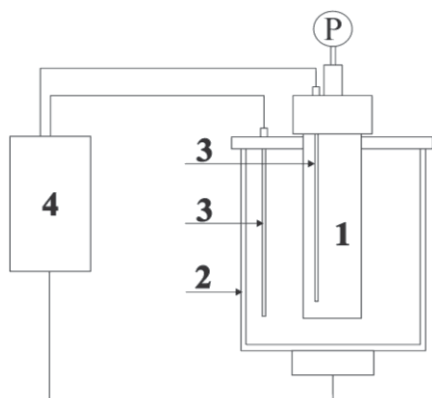


Рис. 1. Схема лабораторной установки термолиза: 1 – реактор периодического действия, 2 – печь, 3 – термопара, 4 – программируемый логический контроллер, P – манометр [44]

Fig.1. Scheme of a laboratory unit: 1 – batch reactor, 2 – furnace, 3 – thermocouple, 4 – programmable logic controller, P – pressure-gauge [44]

Установка представляет собой реактор периодического действия объемом 12 см³. Автоклав оснащен механической мешалкой и двумя термопарами. Программируемый логический контроллер регулирует скорость перемешивания и температуру, а также контролирует давление в системе. Масса образца составляла 6 г. Перед испытаниями реактор с образцом продували инертным газом, затем закрывали и нагревали со скоростью 15 °С/мин. При достижении заданной температуры реактор выдерживали 3,5 часа. Выход газообразных продуктов крекинга рассчитывали по потере массы реактора после удаления газообразных продуктов. Вещественный состав жидких продуктов термолиза определялся по аналогии с описанной выше методикой определения вещественного состава исходной нефти. Далее реактор промывали хлороформом и взвешивали. Полученная разница между массой реактора до и после эксперимента определялась как содержание твердых продуктов термолиза (кокс).

Определение содержания основного азота в асфальтенах проводилось методом потенциометрического титрования с помощью потенциометра Mettler Toledo S80_K. Навеска образца составляла 0,05 г. Навеску растворяли в 5 мл толуола (бензола), добавляли 20–25 мл уксусной кислоты. В качестве титранта применяли уксуснокислый раствор хлорной кислоты. Расчет содержания $N_{\text{осн}}$ в асфальтенах в мас. % производился по формуле:

$$N_{\text{осн}} = \frac{14 \cdot 100 \cdot K_{\text{HClO}_4} \cdot V_k}{1000 \cdot m},$$

где K_{HClO_4} – концентрация титранта, моль/л; V_k – количество титранта, пошедшее на титрование, мл; m – масса нефтепродукта, г.

Структурно-групповой анализ асфальтенов проводился с использованием данных об их элементном составе, средней молекулярной массе и спектроскопии ЯМР ¹H. Методика расчета структурно-групповых параметров асфальтенов приведена в [45]. Методом структурно-группового анализа рассчитаны следующие усредненные структурные параметры асфальтенов: f_a, f_n, f_p – относительное содержание атомов углерода в ароматических, нафтеновых и парафиновых структурных фрагментах соответственно.

Молекулярные массы асфальтенов измерялись методом криоскопии в нафталине. Концентрация образца в нафталине находилась в диапазоне 0,5–0,7 мас. %. Относительная ошибка определения молекулярных масс составляла не более 5,0 отн. %.

Элементный состав исходной нефти и асфальтенов определялся с использованием CHNS-анализатора Vario EL Cube методом прямого сжигания при температуре 1200 °С. Абсолютная ошибка не превышала ±0,1 % для каждого определяемого элемента. Содержание кислорода оценива-

ли по разнице между 100 % и суммарным содержанием элементов C, H, N, S.

Спектры ЯМР ^1H асфальтенов получены с использованием Фурье-спектрометра Bruker AVANCE-AV-300 с рабочей частотой 300 МГц. В процессе пробоподготовки образцы растворялись в CDCl_3 ; концентрация веществ в растворе составляла 1 мас. %. В качестве внутреннего стандарта использовался гексаметилдисилоксан.

Агрегативная устойчивость асфальтенов оценивалась спектрофотометрическим методом с использованием прибора Perkin Elmer Lambda 950. Анализ проводился в течение 7200 с (шаг – 5 с). Толщина кюветы составляла 10 мм, длина волны – 620 нм. Раствор асфальтенов в хлороформе 1,5 мас. % смешивался в кювете с *n*-гексаном в соотношении 1:3, и анализ проводился по вышеописанному режиму.

Результаты и их обсуждение

Для получения модельных азотсодержащих асфальтенов (асфальтеноподобных азотистых оснований) проведен термоллиз исходной и модельных нефтяных систем при температурах 380 и 400 °C в течение 4 часов. По составу продуктов термоллиза была определена оптимальная температура для получения модельных асфальтенов. В табл. 3 представлен состав продуктов термоллиза нефтяных систем.

Образование газа в процессе термоллиза нефтяных систем при 400 °C составляет 3,0–3,3 мас. %, тогда как при температуре 380 °C образуется 0,5–0,8 мас. % газа. Концентрация хинолина в нефтяной системе слабо влияет на содержание газообразных продуктов термоллиза. Доля кокса в продуктах термоллиза всех образцов при 380 °C не превышает 0,3 мас. %, тогда как повышение температуры до 400 °C приводит к значительному образованию твердых нерастворимых продуктов 4,1–2,8 мас. %. Образование кокса снижается с увеличением в системе концентрации хинолина. Это связано со снижением доли высокомолекулярных гетероорганических компонентов, являющихся прекурсорами кокса в термических процессах.

Таблица 3. Состав продуктов термоллиза нефтяных систем при различных температурах (°C)

Table 3. Composition of thermolysis products of petroleum systems at different temperatures (°C)

Объект Object	Content of compounds, wt % Содержание компонентов, мас. %									
	Газ/Газ		Масла Hydrocarbons		Смолы Resins		Асфальтены Asphaltenes		Кокс Coke	
	380	400	380	400	380	400	380	400	380	400
H ₀ /O ₀	0,8	3,3	72,1	75,9	16,2	11,0	10,7	5,8	0,2	4,1
H ₁ /O ₁	0,6	3,0	70,7	69,5	19,4	18,8	9,2	5,1	0,1	3,5
H ₂ /O ₂	0,5	3,2	69,1	71,4	22,2	18,2	8,0	4,3	0,2	3,0
H ₃ /O ₃	0,5	3,3	67,7	70,2	24,3	18,8	7,2	4,8	0,3	2,8

Содержание смолистых веществ в продуктах термоллиза при 380 °C увеличивается с ростом содержания хинолина в модельных нефтяных системах. Это указывает на неполную конверсию хинолина в данных условиях. В процессе термоллиза при 400 °C такой тенденции не наблюдается. Содержание смол в продуктах термоллиза модельных нефтей при 400 °C практически равное и составляет 18–19 мас. %. Это свидетельствует о достаточной конверсии хинолина и установлении равновесия в системе при 400 °C в течение 4 часов. Содержание асфальтенов снижается независимо от температуры термоллиза нефтяных систем. При этом количество асфальтенов, полученных при 400 °C, в 1,5–2 раза ниже, чем при 380 °C. Важно, что в продуктах термоллиза нефтяных систем при 400 °C содержание асфальтенов колеблется в достаточно узком диапазоне (4,3–5,8 мас. %). Это также подтверждает достижение химического равновесия в данных условиях. Повышение температуры термоллиза представляется нецелесообразным в связи с вероятным образованием значительных количеств кокса и снижением содержания асфальтеновых веществ, что не соответствует целям настоящей работы. Таким образом, на основании полученных данных о составе продуктов термоллиза нефтяных систем для дальнейших исследований были выбраны синтетические асфальтеноподобные вещества, полученные при 400 °C.

Данные структурно-группового состава показывают, что средняя молекулярная масса синтетических асфальтенов из продуктов термоллиза модельных нефтяных систем составляет 615–771 а.е.м., что в 2 раза ниже относительно асфальтенов исходной нефти (табл. 4). Изменение молекулярной массы асфальтенов не имеет прямой зависимости от состава термолизируемой нефтяной системы. Содержание N_{осн} в составе синтетических асфальтенов на 0,3–0,8 мас. % выше по сравнению с исходными асфальтенами. Это указывает на встраивание азотистых фрагментов в молекулярную структуру асфальтенов и позволяет получать синтетические асфальтеноподобные азотистые основания посредством термоллиза модельных смесей. Наибольшим содержанием N_{осн} обладают асфальтены, полученные при термоллизе модельных нефтяных систем с содержанием азота 1 и 2 мас. %. Вероятно, повышение концентрации хинолина в нефти выше определенного порога препятствует термическим превращениям компонентов. Это приводит к снижению степени конверсии хинолина и уменьшает встраивание хинолиновых фрагментов в структуру асфальтенов. Фактор ароматичности асфальтенов в процессе термоллиза исходной нефти значительно возрастает (практически на 20 %) со снижением доли нафтового и парафинового углерода на 4 и 15 % соответственно. При этом содержание атомов

углерода в ароматических фрагментах синтетических асфальтеноподобных азотистых оснований на 2–3 % выше, чем у AT_0 . Это также подтверждает встраивание хинолина в молекулярную структуру асфальтенов. Содержание атомов углерода в нафтеновых циклах синтетических асфальтенов колеблется в узком диапазоне 21,2–21,5 % и не зависит от состава термолизуемой нефти. Однако доля парафинового углерода в синтетических асфальтенах снижается на 1,5–2,3 % при увеличении концентрации хинолина в модельной нефтяной системе. Все это в совокупности связано с отщеплением алкильных фрагментов и с встраиванием хинолиновых (ароматических) фрагментов в структуру асфальтеновых веществ в процессе термолиза.

Результаты определения коллоидной стабильности показывают, что асфальтены продуктов термолиза исходной нефти в два раза более устойчивы к седиментации по сравнению с исходными нативными асфальтенами (рис. 2). Учитывая данные структурно-группового состава, определяющим фактором в повышении агрегативной стабильности асфальтенов является двукратное снижение их средней молекулярной массы после термолиза. Безусловно, повышение фактора ароматичности и снижение доли алифатических фрагментов также оказывают влияние на стабильность асфальтенов, однако такие структурные изменения, как правило, напротив, приводят к повышению склонности асфальтеновых молекул к агрегации и седиментации. Следует отметить, что процесс седиментации синтетических асфальтенов протекает более 7200 секунд (нет выхода на плато), тогда как осаждение исходных асфальтенов завершается в течение 3000 секунд. Таким образом, установлено, что асфальтены из термически преобразованного углеводород-

ного сырья обладают значительно более высокой агрегативной устойчивостью.

Таблица 4. Структурно-групповые параметры исходных асфальтенов и синтетических асфальтеноподобных веществ

Table 4. Structural group parameters of initial asphaltenes and synthetic asphaltene-like substances

Параметры/Parameters	A_0	AT_0	AT_1	AT_2	AT_3
ММ, а.е.м./MW, a.m.u.	1436	615	771	715	690
$N_{очн}/N_{bas}$	1,77	1,95	2,35	2,49	2,04
Распределение атомов углерода по структурным фрагментам, отн. % Distribution of carbon atoms among structural fragments, %					
f_a	47,0	65,2	67,1	67,4	67,8
f_n	25,2	21,5	21,2	21,4	21,2
f_{ar}	27,8	13,3	11,7	11,2	11,0

A_0 , AT_0 – асфальтены, выделенные из исходной нефти и продуктов ее термолиза соответственно; AT_1 , AT_2 , AT_3 – асфальтены, выделенные из продуктов термолиза модельных нефтяных систем с содержанием азота 1, 2, 3 мас. % соответственно/ A_0 , AT_0 – asphaltenes from the original oil and its thermolysis products, respectively; AT_1 , AT_2 , AT_3 – asphaltenes from thermolysis products of model petroleum systems with nitrogen content of 1, 2, 3 wt %, respectively.

Агрегативная устойчивость синтетических асфальтеноподобных веществ полностью коррелирует с содержанием в них $N_{очн}$. Так, коллоидная стабильность синтетических асфальтенов повышается с увеличением в них содержания $N_{очн}$. Точка начала осаждения AT_0 ($N_{очн}=1,95$ мас. %) наступает на 20 % ранее по сравнению с AT_2 ($N_{очн}=2,49$ мас. %). Таким образом, установлено, что коллоидная стабильность асфальтенов повышается с увеличением в их молекулярной структуре содержания $N_{очн}$.

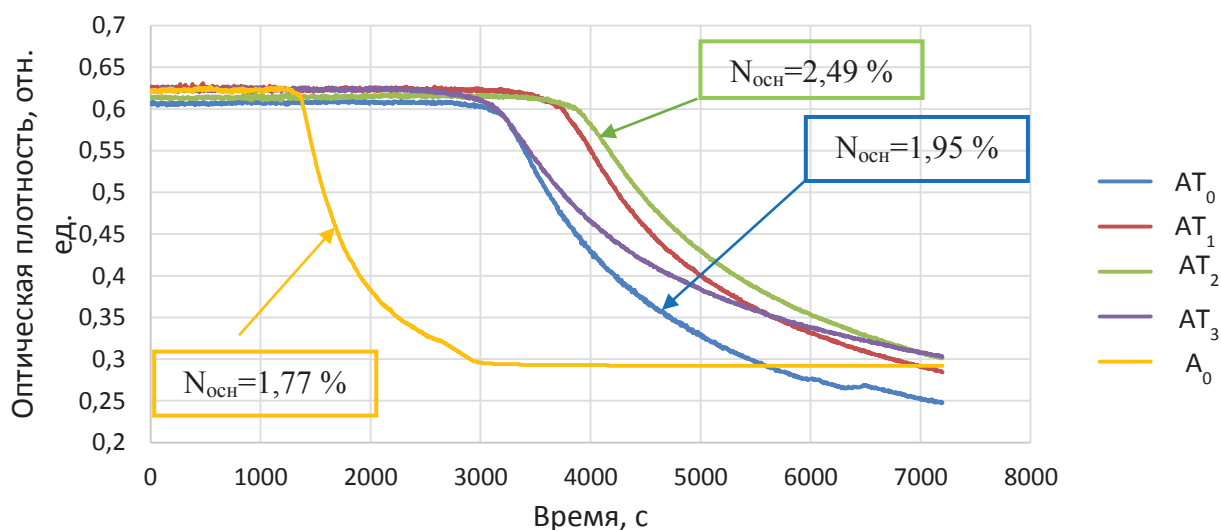


Рис. 2. Влияние содержания основного азота в структуре асфальтеновых веществ на их агрегативную стабильность
Fig. 2. Impact of basic nitrogen content in the structure of asphaltene substances on their aggregative stability

Заключение

В ходе проведенного исследования показана возможность получения синтетических асфальтеноподобных азотистых оснований посредством термоллиза модельных нефтяных систем с различным содержанием основного азота (хинолина) при температуре 400 °C в течение 4 часов. В процессе термоллиза модельных нефтяных систем в молекулярную структуру синтетических асфальтеноподобных веществ дополнительно встраивается 0,3–0,8 мас. % основного азота. Молекулярная масса синтетических асфальтеноподобных веществ в два раза ниже относительно асфальтенов исходной нефти. Изменение молекулярной массы асфальтенов не имеет прямой зависимости от состава термолизируемой нефтяной системы. С увеличением в синтетических асфальтеноподобных веществах ос-

новного азота возрастает фактор ароматичности на 2–3 % со снижением доли парафинового углерода.

Установлено, что асфальтены из термически преобразованной нефти в два раза более устойчивы к седиментации по сравнению с исходными асфальтенами в связи с двукратным снижением их средней молекулярной массы. Показано, что скорость седиментации синтетических асфальтеноподобных азотистых оснований в два–три раза ниже по сравнению с исходными асфальтенами. Установлено, что коллоидная стабильность синтетических асфальтеноподобных веществ повышается с увеличением в их молекулярной структуре содержания $N_{\text{осн}}$. Полученные результаты могут использоваться для прогнозирования коллоидной стабильности асфальтенов тяжелых нефтей и нефтяных остатков в зависимости от их структурно-группового состава.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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
2. Кривошеков С.Н., Кочнев А.А., Равелев К.А. Разработка алгоритма определения технологических параметров нагнетания кислотного состава при обработке призабойной зоны пласта с учетом экономической эффективности // *Записки Горного института*. – 2021. – Т. 250. – С. 587–595. DOI: 10.31897/PMI.2021.4.12
3. *Asphaltenes, heavy oils, and petroleomics* / O.C. Mullins, E.Y. Sheu, A. Hammami, A.G. Marshall. – N.Y., USA: Springer, 2006. – 670 p.
4. Ancheyta J., Speight J. *Hydroprocessing of heavy oils and residua*. – Boca Raton; USA: CRC Press, 2007. – 376 p.
5. Muraza O., Galadima A. Aquathermolysis of heavy oil: a review and perspective on catalyst development // *Fuel*. – 2015. – Vol. 157. – P. 219–231. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.04.065>
6. In-depth characterization of light, medium and heavy oil asphaltenes as well as asphaltenes subfractions / M. Salenzadeh, M.M. Husein, C. Ghotbi, B. Dabir, V. Taghikhani // *Fuel*. – 2022. – Vol. 324. – P. 124525. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.124525>
7. Groenzin H., Mullins O.C. Molecular size and structure of asphaltenes from various sources // *Energy Fuels*. – 2000. – Vol. 14. – № 3. – P. 677–684. DOI: <https://doi.org/10.1021/ef990225z>
8. Mullins O.C. The modified Yen model // *Energy Fuels*. – 2010. – Vol. 24. – № 4. – P. 2179–2207. DOI: <https://doi.org/10.1021/ef900975e>
9. Unraveling the molecular structures of asphaltenes by atomic force microscopy / B. Shuler, G. Meyer, D. Pena, O.C. Mullins, L. Gross // *J. Am. Chem. Soc.* – 2015. – Vol. 137. – № 31. – P. 9870–9876. DOI: <https://doi.org/10.1021/jacs.5b04056>
10. Relations between asphaltene structures and their physical and chemical properties: the rosary-type structure / S. Acevedo, A. Castro, J.G. Negrin, A. Fernandez, G. Escobar, V. Piscitelli, F. Delolme, G. Dessalces // *Energy Fuels*. – 2007. – Vol. 21. – № 4. – P. 2165–2175. DOI: <https://doi.org/10.1021/ef070089v>
11. Структурные фрагменты, содержащие сульфидные и эфирные связи в молекулах высоко- и низкомолекулярных асфальтенов тяжелой нефти месторождения Усинское / В.П. Сергун, Т.В. Чешкова, Т.А. Сагаченко, Р.С. Мин // *Нефтехимия*. – 2016. – Т. 56. – № 1. – С. 13–18.
12. Heavy petroleum composition. 3. Asphaltene aggregation / A.M. McKenna, L.J. Donald, J.E. Fitzsimmons, P. Juyal, V. Spicer, K.G. Standing, A.G. Marshall, R.P. Rodgers // *Energy Fuels*. – 2013. – Vol. 27. – № 3. – P. 1246–1256. DOI: <https://doi.org/10.1021/ef3018578>
13. Asphaltenes – problematic but rich in potential / K. Akbarzadeh, A. Hammami, A. Kharrat, D. Zhang, S. Allenson, J. Creek, S. Kabir, A. Jamaluddin, A.G. Marshall, R.P. Rodgers, O.C. Mullins, T. Solbakken // *Oilfield Review*. – 2007. – Vol. 19. – P. 22–43.
14. Evdokimov I.N., Fesan A.A., Losev A.P. New answers to the optical interrogation of asphaltenes: monomers and primary aggregates from steady-state fluorescence studies // *Energy Fuels*. – 2016. – Vol. 30. – № 6. – P. 4494–4503. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.6b00027>
15. Li X., Chi P., Sun Q. Effects of asphaltene concentration and asphaltene agglomeration on viscosity // *Fuel*. – 2019. – Vol. 255. – P. 115825. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.115825>
16. Голубев И.А., Голубев А.В., Лаптев А.Б. Практика применения аппаратов магнитной обработки для интенсификации процессов первичной подготовки нефти // *Записки Горного института*. – 2020. – Т. 245. – С. 554–560. DOI: 10.31897/PMI.2020.5.7
17. Molecular polydispersity improves prediction of asphaltene aggregation / G. Javanbakht, M. Sedghi, W. Welch, L. Goual, M.P. Hoepfner // *J. Mol. Liq.* – 2018. – Vol. 256. – P. 382–394. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2018.02.051>
18. Коробов Г.Ю., Парфенов Д.В., Нгуен В.Т. Механизмы образования асфальтосмолопарафиновых отложений и факторы интенсивности их формирования // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2023. – Т. 334. – № 4. – С. 103–116. DOI: 10.18799/24131830/2023/4/3940
19. Nurgalieva K.S., Saychenko L.A., Riazi M. Improving the efficiency of oil and gas wells complicated by the formation of asphalt-resin-paraffin deposits // *Energies*. – 2021. – Vol. 14. – P. 6673. DOI: 10.3390/en14206673

20. Развитие и применение современных методов *in situ* для исследования стабильности нефтяных систем и физико-химических процессов в них / О.Н. Мартыанов, Ю.В. Ларичев, Е.В. Морозов, С.Н. Трухан, С.Г. Казарян // *Успехи химии*. – 2017. – Т. 86. – № 11. – С. 999–1023. DOI: <https://doi.org/10.1070/rcr4742>
21. Advances in asphaltene science and the Yen-Mullins model / O.C. Mullins, H. Sabbah, J. Eyssautier, A.E. Pomerantz, L. Barré, A.B. Andrews, Y. Ruiz-Morales, F. Mostowfi, R. McFarlane, L. Goual, R. Lepkowitz, T. Cooper, J. Orbulescu, R.M. Leblanc, J. Edwards, R.N. Zare // *Energy Fuels*. – 2012. – Vol. 26. – № 7. – P. 3986–4003. DOI: <https://doi.org/10.1021/ef300185p>
22. Rogel E. Studies on asphaltene aggregation via computational chemistry // *Colloids Surf. A*. – 1995. – Vol. 104. – № 1. – P. 85–93. DOI: [https://doi.org/10.1016/0927-7757\(95\)03234-5](https://doi.org/10.1016/0927-7757(95)03234-5)
23. Quantitative molecular representation and sequential optimization of Athabasca asphaltenes / J.M. Sheremata, M.R. Gray, H.D. Dettman, W.C. McCaffrey // *Energy Fuels*. – 2004. – Vol. 18. – № 5. – P. 1377–1384. DOI: <https://doi.org/10.1021/ef049936+>
24. Supramolecular assembly model for aggregation of petroleum asphaltenes / M.R. Gray, R.R. Tykewinski, J.M. Stryker, X. Tan // *Energy Fuels*. – 2011. – Vol. 25. – № 7. – P. 3125–3134. DOI: <https://doi.org/10.1021/ef200654p>
25. Gabrienko A.A., Lai C.H., Kazarian S.G. In situ chemical imaging of asphaltene precipitation from crude oil induced by n-heptane // *Energy Fuels*. – 2014. – Vol. 28. – № 2. – P. 964–971. DOI: <https://doi.org/10.1021/ef402255c>
26. Chemical visualization of asphaltenes aggregation processes studied in situ with ATR-FTIR spectroscopic imaging and NMR imaging / A.A. Gabrienko, E.V. Morozov, V. Subramani, O.N. Martyanov, S.G. Kazarian // *J. Phys. Chem. C*. – 2015. – Vol. 119. – № 5. – P. 2646–2660. DOI: <https://doi.org/10.1021/jp511891f>
27. Ганеева Ю.М., Юсупова Т.Н., Романов Г.В. Асфальтеновые наноагрегаты: структура, фазовые превращения, влияние на свойства нефтяных систем // *Успехи химии*. – 2011. – Т. 80. – № 10. – С. 1034–1050.
28. UNIFAC residual marine fuels stability prediction from NMR and elemental analysis of SARA components / I. Efimov, K.I. Smyshlyaeva, V.G. Povarov, E.D. Buzyreva, N.V. Zhitkov, M.A. Vovk, V.A. Rudko // *Fuel*. – 2023. – Vol. 352. – P. 129014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.129014>
29. Methods for determining asphaltene stability in crude oils / R. Guzmán, J. Ancheyta, F. Trejo, S. Rodríguez // *Fuel*. – 2017. – Vol. 188. – P. 530–543. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.10.012>
30. Asphaltene genesis influence on the low-sulfur residual marine fuel sedimentation stability / K.I. Smyshlyaeva, V.A. Rudko, K.A. Kuzmin, V.G. Povarov // *Fuel*. – 2022. – Vol. 328. – P. 125291. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.125291>
31. Molecular dynamics study of nanoaggregation in asphaltene mixtures: effects of the N, O, and S heteroatoms / H.S. Silva, A.C. Sodero, B. Bouysiere, H. Carrier, J. Korb, A. Alfara, G. Vallverdu, D. Bégué, I. Baraille // *Energy Fuels*. – 2016. – Vol. 30. – № 7. – P. 5656–5664. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.6b01170>
32. Investigation of the effect of sulfur heteroatom on asphaltene aggregation / A.C. Sodero, H.S. Silva, P.G. Level, B. Bouysiere, J. Korb, H. Carrier, A. Alfara, D. Bégué, I. Baraille // *Energy Fuels*. – 2016. – Vol. 30. – № 6. – P. 4758–4766. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.6b00757>
33. Evaluation of asphaltene adsorption free energy at the oil–water interface: role of heteroatoms / J. Mizuhara, Y. Liang, Y. Masuda, K. Kobayashi, H. Iwama, H. Yonebayashi // *Energy Fuels*. – 2020. – Vol. 34. – № 5. – P. 5267–5280. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.9b03864>
34. Компьютерное моделирование асфальтенов (обзор) / С.В. Люлин, А.Д. Глова, С.Г. Фалькович, В.А. Иванов // *Нефтехимия*. – 2018. – Т. 58. – № 12. – С. 983–1004.
35. Effect of the heteroatom presence in different positions of the model asphaltene structure on the self-aggregation: MD and DFT study / A. Ekramipooya, F.M. Valadi, A. Farisabadi, M.R. Gholami // *Journal of Molecular Liquids*. – 2021. – Vol. 334. – P. 116109 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2021.116109>
36. Takanoashi T., Sato S., Tanaka R. Structural relaxation behaviors of three different asphaltenes using MD calculations // *Pet. Sci. Technol.* – 2004. – Vol. 22. – № 7–8. – P. 901–914. DOI: <https://doi.org/10.1081/LFT-120038716>
37. Molecular dynamics study of the aggregation behavior of polycyclic aromatic hydrocarbon molecules in n-heptane–toluene mixtures: assessing the heteroatom content effect / L. Ramírez, I. Moncayo-Riascos, F.B. Cortés, C.A. Franco, R. Ribadeneira // *Energy Fuels*. – 2021. – Vol. 35. – № 4. – P. 3119–3129. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.0c04153>
38. Effect of asphaltene structure on association and aggregation using molecular dynamics / M. Sedghi, L. Goual, W. Welch, J. Kubelka // *J. Phys. Chem. B*. – 2013. – Vol. 117. – № 18. – P. 5765–5776. DOI: <https://doi.org/10.1021/jp401584u>
39. Yaseen S., Mansoori G.A. Asphaltene aggregation due to waterflooding (a molecular dynamics study) // *J. Petrol. Sci. Eng.* – 2018. – Vol. 170. – P. 177–183. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2018.06.043>
40. Resins and asphaltenes of light and heavy oils: their composition and structure / T.V. Cheshkova, V.P. Sergun, E.Yu. Kovalenko, N.N. Gerasimova, T.A. Sagachenko, R.S. Min // *Energy Fuels*. – 2019. – Vol. 33. – № 9. – P. 7971–7982. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.9b00285>
41. Азотсодержащие основания смол тяжелой нефти Усинского месторождения / Н.Н. Герасимова, А.С. Классен, Р.С. Мин, Т.А. Сагаченко // *Химия в интересах устойчивого развития*. – 2016. – Т. 24. – № 6. – С. 739–744. DOI: <http://doi.org/10.15372/KhUR20180103>
42. Коваленко Е.Ю., Сагаченко Т.А., Мин Р.С. Влияние азотистых соединений нефти на образование агрегатов асфальтенов // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2016. – Т. 327. – № 3. – С. 119–126.
43. Ларичев Ю.В., Коваленко Е.Ю., Мартыанов О.Н. Влияние азотсодержащих оснований на строение первичных кластеров асфальтенов и динамику процесса агрегации тяжелых фракций нефти // *Нефтехимия*. – 2019. – Т. 59. – № 6. – С. 638–644. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0028242119060108>
44. Urazov Kh.Kh., Sviridenko N.N. NiO based catalysts obtained «in-situ» for heavy crude oil upgrading: effect of NiO precursor on the catalytic cracking products composition // *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*. – 2021. – Vol. 127. – P. 151–156. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2021.07.044>
45. Effect of hydrogen-donor of heavy crude oil catalytic aquathermolysis in the presence of a nickel-based catalyst / Kh.Kh. Urazov, N.N. Sviridenko, Yu.A. Iovik, E.N. Kolobova, M.V. Grabchenko, I.A. Kurzina, I.I. Mukhamatdinov // *Catalysts*. – 2022. – Vol. 12. – № 10. – С. 1154. DOI: <https://doi.org/10.3390/catal12101154>

Информация об авторах

Дмитрий Сергеевич Корнеев, кандидат химических наук, доцент Высшей нефтяной школы, заведующий лабораторией химии нефти, Югорский государственный университет, Россия, 628012, г. Ханты-Мансийск, ул. Чехова, 16, korneevds90@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3398-5729>

Поступила в редакцию: 19.04.2024

Поступила после рецензирования: 02.05.2024

Принята к публикации: 24.01.2025

REFERENCES

1. 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, pp. 8300. DOI: 10.3390/en15218300
2. Krivoshchekov S.N., Kochnev A.A., Ravelev K.A. Development of an algorithm for determining the technological parameters of acid composition injection during treatment of the near-bottomhole zone, taking into account economic efficiency. *Journal of Mining Institute*, 2021, vol. 250, pp. 587–595. (In Russ.) DOI: 10.31897/PMI.2021.4.12
3. Mullins O.C., Sheu E.Y., Hammami A., Marshall A.G. *Asphaltenes, heavy oils, and petroleomics*. N.Y., USA, Springer, 2006. 670 p.
4. Ancheyta J., Speight J. *Hydroprocessing of heavy oils and residua*. Boca Raton, USA, CRC Press, 2007. 376 p.
5. Muraza O., Galadima A. Aquathermolysis of heavy oil: a review and perspective on catalyst development. *Fuel*, 2015, vol. 157, pp. 219–231. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.04.065>
6. Salenzadeh M., Husein M.M., Ghotbi C., Dabir B., Taghikhani V. In-depth characterization of light, medium and heavy oil asphaltenes as well as asphaltenes subfractions. *Fuel*, 2022, vol. 324, pp. 124525. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.124525>
7. Groenzin H., Mullins O.C. Molecular size and structure of asphaltenes from various sources. *Energy Fuels*, 2000, vol. 14, no. 3, pp. 677–684. DOI: <https://doi.org/10.1021/ef990225z>
8. Mullins O.C. The modified Yen model. *Energy Fuels*, 2010, vol. 24, no. 4, pp. 2179–2207. DOI: <https://doi.org/10.1021/ef900975e>
9. Shuler B., Meyer G., Pena D., Mullins O.C., Gross L. Unraveling the molecular structures of asphaltenes by atomic force microscopy. *J. Am. Chem. Soc.*, 2015, vol. 137, no. 31, pp. 9870–9876. DOI: <https://doi.org/10.1021/jacs.5b04056>
10. Acevedo S., Castro A., Negrin J.G., Fernandez A., Escobar G., Piscitelli V., Delolme F., Dessalces G. Relations between asphaltene structures and their physical and chemical properties: the rosary-type structure. *Energy Fuels*, 2007, vol. 21, no. 4, pp. 2165–2175. DOI: <https://doi.org/10.1021/ef070089v>
11. Sergun V.P., Cheshkova T.V., Sagachenko T.A., Min R.S. Structural units with sulfur and ether/ester bonds in molecules of high- and low-molecular-weight asphaltenes of USA heavy oil. *Petroleum Chemistry*, 2016, vol. 56, no. 1, pp. 10–15. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.1134/S0965544115060109>
12. McKenna A.M., Donald L.J., Fitzsimmons J.E., Juyal P., Spicer V., Standing K.G., Marshall A.G., Rodgers R.P. Heavy petroleum composition. 3. Asphaltene aggregation. *Energy Fuels*, 2013, vol. 27, no. 3, pp. 1246–1256. DOI: <https://doi.org/10.1021/ef3018578>
13. Akbarzadeh K., Hammami A., Kharrat A., Zhang D., Allenson S., Creek J., Kabir S., Jamaluddin A., Marshall A.G., Rodgers R.P., Mullins O.C., Solbakken T. Asphaltenes – problematic but rich in potential. *Oilfield Review*, 2007, vol. 19, pp. 22–43.
14. Evdokimov I.N., Fesan A.A., Losev A.P. New answers to the optical interrogation of asphaltenes: monomers and primary aggregates from steady-state fluorescence studies. *Energy Fuels*, 2016, vol. 30, no. 6, pp. 4494–4503. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.6b00027>
15. Li X., Chi P., Sun Q. Effects of asphaltene concentration and asphaltene agglomeration on viscosity. *Fuel*, 2019, vol. 255, pp. 115825. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.115825>
16. Golubev I.A., Golubev A.V., Laptev A.B. Practice of using the magnetic treatment devices to intensify the processes of primary oil treating. *Journal of Mining Institute*, 2020, vol. 245, pp. 554–560. (In Russ.) DOI: 10.31897/PMI.2020.5.7.
17. Javanbakht G., Sedghi M., Welch W., Goual L., Hoepfner M.P. Molecular polydispersity improves prediction of asphaltene aggregation. *J. Mol. Liq.*, 2018, vol. 256, pp. 382–394. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2018.02.051>
18. Korobov G.Yu., Parfenov D.V., Van T.N. Mechanism of the formation of asphalt-resin and paraffin deposits and factors influencing their intensity. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2023, vol. 334, no. 4, pp. 103–116. (In Russ.) DOI: 10.18799/24131830/2023/4/3940
19. Nurgalieva K.S., Saychenko L.A., Riazi M. Improving the efficiency of oil and gas wells complicated by the formation of asphalt-resin-paraffin deposits. *Energies*, 2021, vol. 14, pp. 6673. DOI: 10.3390/en14206673
20. Martyanov O.N., Larichev Yu.V., Morozov E.V., Trukhan S.N., Kazarian S.G. The stability and evolution of oil systems studied via advanced methods in situ. *Russian Chemical Reviews*, 2017, vol. 86, pp. 999–1023. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.1070/rcr4742>
21. Mullins O.C., Sabbah H., Eyssautier J., Pomerantsev A.E., Barré L., Andrews A.B., Ruiz-Morales Y., Mostowfi F., McFarlane R., Goual L., Lepkiewicz R., Cooper T., Orbulescu J., Leblanc R.M., Edwards J., Zare R.N. Advances in asphaltene science and the Yen-Mullins model. *Energy Fuels*, 2012, vol. 26, no. 7, pp. 3986–4003. DOI: <https://doi.org/10.1021/ef300185p>
22. Rogel E. Studies on asphaltene aggregation via computational chemistry. *Colloids Surf. A*, 1995, vol. 104, no. 1, pp. 85–93. DOI: [https://doi.org/10.1016/0927-7757\(95\)03234-5](https://doi.org/10.1016/0927-7757(95)03234-5)
23. Sheremata J.M., Gray M.R., Dettman H.D., McCaffrey W.C. Quantitative molecular representation and sequential optimization of Athabasca asphaltenes. *Energy Fuels*, 2004, vol. 18, no. 5, pp. 1377–1384. DOI: <https://doi.org/10.1021/ef049936+>
24. Gray M.R., Tykwinski R.R., Stryker J.M., Tan X. Supramolecular assembly model for aggregation of petroleum asphaltenes. *Energy Fuels*, 2011, vol. 25, no. 7, pp. 3125–3134. DOI: <https://doi.org/10.1021/ef200654p>

25. Gabrienko A.A., Lai C.H., Kazarian S.G. In situ chemical imaging of asphaltene precipitation from crude oil induced by n-heptane. *Energy Fuels*, 2014, vol. 28, no. 2, pp. 964–971. DOI: <https://doi.org/10.1021/ef402255c>
26. Gabrienko A.A., Morozov E.V., Subramani V., Martyanov O.N., Kazarian S.G. Chemical visualization of asphaltene aggregation processes studied in situ with ATR-FTIR spectroscopic imaging and NMR imaging. *J. Phys. Chem. C*, 2015, vol. 119, no. 5, pp. 2646–2660. DOI: <https://doi.org/10.1021/jp511891f>
27. Ganeeva Yu.M., Yusupova T.N., Romanov G.V. Asphaltene nano-aggregates: structure, phase transitions and effect on petroleum systems. *Russ. Chem. Rev.*, 2011, vol. 80, no. 10, pp. 993. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.1070/RC2011v080n10ABEH004174>
28. Efimov I., Smyshlyaeva K.I., Povarov V.G., Buzyreva E.D., Zhitkov N.V., Vovk M.A., Rudko V.A. UNIFAC residual marine fuels stability prediction from NMR and elemental analysis of SARA components. *Fuel*, 2023, vol. 352, pp. 129014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.129014>
29. Guzmán R., Ancheytá J., Trejo F., Rodríguez S. Methods for determining asphaltene stability in crude oils. *Fuel*, 2017, vol. 188, pp. 530–543. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.10.012>
30. Smyshlyaeva K.I., Rudko V.A., Kuzmin K.A., Povarov V.G. Asphaltene genesis influence on the low-sulfur residual marine fuel sedimentation stability. *Fuel*, 2022, vol. 328, pp. 125291. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.125291>
31. Silva H.S., Sodero A.C., Bouyssiere B., Carrier H., Korb J., Alfara A., Vallverdu G., Bégue D., Baraille I. Molecular dynamics study of nanoaggregation in asphaltene mixtures: Effects of the N, O, and S heteroatoms. *Energy Fuels*, 2016, vol. 30, no. 7, pp. 5656–5664. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.6b01170>
32. Sodero A.C., Silva H.S., Level P.G., Bouyssiere B., Korb J., Carrier H., Alfara A., Bégue D., Baraille I. Investigation of the effect of sulfur heteroatom on asphaltene aggregation. *Energy Fuels*, 2016, vol. 30, no. 6, pp. 4758–4766. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.6b00757>
33. Mizuhara J., Liang Y., Masuda Y., Kobayashi K., Iwama H., Yonebayashi H. Evaluation of asphaltene adsorption free energy at the oil–water interface: role of heteroatoms. *Energy Fuels*, 2020, vol. 34, no. 5, pp. 5267–5280. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.9b03864>
34. Lyulin S.V., Glova A.D., Falkovich S.G., Ivanov V.A., Nazarychev V.M., Lyulin A.V., Larin S.V., Antonov S.V., Ganan P., Kenny J.M. Computer simulation of asphaltenes. *Petroleum Chemistry*, 2018, vol. 58, no. 12, pp. 983–1004. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.1134/S0965544118120149>
35. Ekramipooya A., Valadi F.M., Farisabadi A., Gholami M.R. Effect of the heteroatom presence in different positions of the model asphaltene structure on the self-aggregation: MD and DFT study. *Journal of Molecular Liquids*, 2021, vol. 334, pp. 116109. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2021.116109>
36. Takanohashi T., Sato S., Tanaka R. Structural relaxation behaviors of three different asphaltenes using MD calculations. *Pet. Sci. Technol.*, 2004, vol. 22, no. 7–8, pp. 901–914. DOI: <https://doi.org/10.1081/LFT-120038716>
37. Ramirez L., Moncayo-Riascos I., Cortés F.B., Franco C.A., Ribadeneira R. Molecular dynamics study of the aggregation behavior of polycyclic aromatic hydrocarbon molecules in n-heptane–toluene mixtures: assessing the heteroatom content effect. *Energy Fuels*, 2021, vol. 35, no. 4, pp. 3119–3129. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.0c04153>
38. Sedghi M., Goual L., Welch W., Kubelka J. Effect of asphaltene structure on association and aggregation using molecular dynamics. *J. Phys. Chem. B*, 2013, vol. 117, no. 18, pp. 5765–5776. DOI: <https://doi.org/10.1021/jp401584u>
39. Yaseen S., Mansoori G.A. Asphaltene aggregation due to waterflooding (A molecular dynamics study). *J. Petrol. Sci. Eng.*, 2018, vol. 170, pp. 177–183. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2018.06.043>
40. Cheshkova T.V., Sergun V.P., Kovalenko E.Yu., Gerasimova N.N., Sagachenko T.A., Min R.S. Resins and asphaltenes of light and heavy oils: their composition and structure. *Energy Fuels*, 2019, vol. 33, no. 9, pp. 7971–7982. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.9b00285>
41. Gerasimova N.N., Klassen A.S., Min R.S., Sagachenko T.A. Nitrogen-containing resin bases from heavy oils of the Usinsk deposit. *Chemistry for Sustainable Development*, 2016, vol. 24, no. 6, pp. 739–744. (In Russ.) DOI: <http://doi.org/10.15372/KhUR20180103>
42. Kovalenko E.Yu., Sagachenko T.A., Min R.S. Effect of nitrogen compounds in oil on formation of asphaltene aggregates. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2016, vol. 327, no. 3, pp. 119–126. (In Russ.)
43. Larichev Y.V., Kovalenko E.Y., Martyanov O.N. Effect of nitrogen bases on the structure of primary asphaltene clusters and dynamics of aggregation of heavy oil fractions. *Pet. Chem.*, 2019, vol. 59, pp. 1195–1200. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.1134/S0965544119110100>
44. Urazov Kh.Kh., Sviridenko N.N. NiO based catalysts obtained «in-situ» for heavy crude oil upgrading: effect of NiO precursor on the catalytic cracking products composition. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 2021, vol. 127, pp. 151–156. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2021.07.044>
45. Urazov Kh.Kh., Sviridenko N.N., Iovik Yu.A., Kolobova E.N., Grabchenko M.V., Kurzina I.A., Mukhamatdinov I.I. Effect of hydrogen-donor of heavy crude oil catalytic aquathermolysis in the presence of a nickel-based catalyst. *Catalysts*, 2022, vol. 12, no. 10, pp. 1154. DOI: <https://doi.org/10.3390/catal12101154>

Information about the authors

Dmitry S. Korneev, Cand. Sc., Associate Professor, Head of the Laboratory of Petroleum Chemistry, Yugra State University, 16, Chekhov street, 628012, Khanty-Mansiysk, Russian Federation. korneevds90@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3398-5729>

Received: 19.04.2024

Revised: 02.05.2024

Accepted: 24.01.2025

УДК 551.734 (551.83;552.513)
DOI: 10.18799/24131830/2025/2/4644
Шифр специальности ВАК: 1.6.4; 1.6.1

Состав и строение терригенных отложений живетского яруса среднего отдела девонской системы по результатам изучения разреза в зоне передовых надвигов Урала (Гремячинский район Пермского края)

И.В. Афонин^{1✉}, А.В. Плюснин², Е.М. Томилина³, Е.С. Рабцевич¹,
И.С. Иванов⁴, И.В. Мякшин⁴, А.И. Сулима³

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

² Альметьевский Государственный Технологический университет «Высшая школа нефти»,
Россия, г. Альметьевск

³ Пермский Государственный национальный исследовательский университет им. А.М. Горького,
Россия, г. Пермь

⁴ Филиал ООО «Лукойл-Инжиниринг» «ПермНИПИнефть» в г. Перми, Россия, г. Пермь

✉heaven05@list.ru

Аннотация. Актуальность. Определяется промышленной нефтегазоносностью девонских терригенных отложений Урала и необходимостью уточнения существующих моделей их формирования для прогноза потенциальных нефтегазовых залежей. **Цель.** Реконструкция условий осадконакопления и определение состава источника сноса терригенных пород живетского яруса по результатам изучения кернового материала скважины Широковская 2. **Объект.** Терригенные породы нерасчленённой толщи воробьевско-ардатовского и пашийского горизонтов живетского яруса среднего отдела девонской системы, вскрытые скважиной Широковская 2. **Методы.** Литолого-фациальный анализ, петрографический анализ, рентгенофлуоресцентный анализ, масс-спектрометрия с индуктивно связанной плазмой. **Результаты и выводы.** Проведены литолого-фациальные, минералогические, петрографические, литогеохимические исследования терригенных отложений воробьевско-ардатовского и пашийского горизонтов среднего девона Берестянского поднятия в районе сочленения Косьвинско-Чусовской седловины Предуральского краевого прогиба и передовых надвигов Западно-Уральской зоны складчатости. Установлено, что формирование исследуемых пород в живетское время происходило в переходных субаквальных обстановках дельтовой равнины. Комплексный анализ показал, что отложения воробьевско-ардатовского возраста являются осадками первого цикла седиментации, а отложения пашийского возраста представляют собой литогенно-петрогенные породы. Состав петрофонда преимущественно отвечает магматическим породам кислого и основного состава и метаморфическим породам. Помимо этого предполагается, что при формировании пород пашийского горизонта в процесс осадконакопления также были вовлечены девонские породы более раннего возраста. Совокупность полученных и опубликованных данных позволяет сделать вывод, что процесс седиментации в живетское время осуществлялся в пассивной континентальной окраине, а поступление обломочного материала происходило с приподнятых выступов фундамента и ранее образованных пород девона.

Ключевые слова: воробьевско-ардатовский и пашийский горизонты, живетский ярус, минералогия, петрография, геохимия, условия формирования, состав источника сноса, геодинамика

Благодарности: Исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (проект № 0721-2020-0041).

Для цитирования: Состав и строение терригенных отложений живетского яруса среднего отдела девонской системы по результатам изучения разреза в зоне передовых надвигов Урала (Гремячинский район Пермского края) / И.В. Афонин, А.В. Плюснин, Е.М. Михайлова, Е.С. Рабцевич, И.С. Иванов, И.В. Мякшин, А.И. Сулима // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 2. – С. 126–140. DOI: 10.18799/24131830/2025/2/4644

UDC 551.734 (551.83;552.513)
DOI: 10.18799/24131830/2025/2/4644

Composition and structure of terrigenous deposits of the Givetian stage of the middle division of the Devonian system based on the results of studying the section in the zone of frontal thrust of the Urals (Gremyachinsky district of Perm Krai)

I.V. Afonin^{1✉}, A.V. Plyusnin², E.M. Tomilina³, E.S. Rabtsevich¹,
I.S. Ivanov⁴, I.V. Myakshin⁴, A.I. Sulima³

¹ National Research Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation

² Almeteyevsk State Technological University "Higher School of Oil", Almeteyevsk, Russian Federation

³ National Research Perm State University, Perm, Russian Federation

⁴ Branch of LLC "Lukoil-Engineering" "PermNIPIneft" in Perm, Perm, Russian Federation

✉heaven05@list.ru

Abstract. Relevance. Industrial oil and gas potential of the Devonian terrigenous deposits of the Urals and the need to refine existing models of their formation to predict potential oil and gas deposits. **Aim.** To reconstruct sedimentation conditions and determine the composition of source area of the Givetian stage terrigenous rocks based on results of studying the core material of the Shirokovskaya 2 well. **Object.** Terrigenous rocks of the undifferentiated strata of the Vorobyov-Ardatov and Pashysky horizons of the Givetian stage of the Devonian system, penetrated by the Shirokovskaya 2 well. **Methods.** Lithological-facial, petrographic, X-ray fluorescence analysis, inductively coupled plasma mass spectrometry. **Results and conclusions.** Lithological-facies, mineralogical, petrographic, lithogeochemical studies were carried out on terrigenous deposits of the Vorobyov-Ardatov and Pashysky horizons of the Middle Devonian of the Berestyansky uplift in the area of junction of the Kosva-Chusovskaya saddle of the Pre-Ural foredeep and forward thrusts of the West Ural fold zone. It was established that the formation of the studied rocks occurred in the transitional subaquatic environments of the delta plain. A comprehensive analysis showed that the sediments of the Vorobyov-Ardatov age are sediments of the first cycle of sedimentation. The deposits of Pashysky age are lithogenic-petrogenic rocks. The composition of the petrofund mainly corresponds to igneous rocks of acidic and basic composition and metamorphic rocks. In addition, it is assumed that during the formation of rocks of the Pashysky horizon, Devonian rocks of an earlier age were also involved in sedimentation. Sedimentation during the Givetian stage took place on the passive continental margin. The supply of clastic material occurred from elevated projections of the basement and due to the erosion of Devonian deposits.

Keywords: Vorobyevsky-Ardatov and Pashysky horizons, Givetian stage, mineralogy, petrography, geochemistry, conditions of forming, composition of the source area, geodynamics

Acknowledgements: The research was carried out with the financial support of the Russian Ministry of Science and Higher Education, grant no. 0721-2020-0041

For citation: Afonin I.V., Plyusnin A.V., Tomilina E.M., Rabtsevich E.S., Ivanov I.S., Myakshin I.V., Sulima A.I. Composition and structure of terrigenous deposits of the Givetian stage of the middle division of the Devonian system based on the results of studying the section in the zone of frontal thrust of the Urals (Gremyachinsky district of Perm Krai). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336. no. 2, pp. 126–140. DOI: 10.18799/24131830/2025/2/4644

Введение

Литолого-фациальные, петрографические и литогеохимические исследования терригенных пород позволяют восстановить этапы формирования и проследить эволюцию осадочных бассейнов. Объектами комплексного исследования стали терригенные отложения живетского яруса среднего отдела девонской системы Пермского края, изученные в разрезе скважины Широковская 2.

Всесторонние исследования среднедевонских терригенных толщ Волго-Уральской антеклизы

представляют особый интерес в связи с их нефтегазоносностью. Вещественные характеристики этого стратиграфического интервала имеют особую значимость. Результаты исследований терригенных пород, проведенные с привлечением как классических, так и современных прецизионных методик, позволят получить новые данные о них, а также позволят реконструировать геодинамические условия формирования этих отложений, что в дальнейшем может быть использовано как при прогнозировании залежей углеводородного сырья и проведении гео-

логоразведочных работ, так и при воссоздании широких палеогеографических реконструкций.

Целью исследования явилось комплексное изучение терригенных отложений живетского яруса для уточнения условий формирования и установления составов пород источника сноса с последующей реконструкцией геодинамических обстановок, контролировавших процесс накопления живетских терригенных толщ.

Краткие сведения о геологическом строении

Согласно унифицированной стратиграфической схеме Восточно-Европейской платформы [1], живетский ярус соответствует старооскольскому надгоризонту и объединяет воробьевский, ардатовский и муллинский горизонты. В Межрегиональной стратиграфической схеме девонских отложений территории России [2] граница среднего и верхнего девона проведена в основании конодонтовой зоны *Mesotaxis falsovalis*. При этом ее положение относительно региональных подразделений точно не определено. Авторами данной статьи в состав живетского яруса включен пашийский горизонт.

Нижняя граница яруса литологически отчетлива и представлена переходом от карбонатных пород эйфельского яруса нижнего отдела девонской системы на перекрывающие их терригенные породы живетского яруса среднего отдела девонской системы. На каротажных диаграммах она совпадает с кровлей эйфельского электрорепера и характеризуется зоной высокого кажущегося сопротивления и положительной аномалией кривой потенциала самопроизвольной поляризации [3]. Стратиграфическое обоснование живетского яруса подтверждено спорово-пыльцевыми комплексами палинозоны *Archaeozonotrites extensus*, которая включает три подзоны с комплексами спор, характерными для воробьевского, ардатовского и муллинского горизонтов [4]. Эти стратиграфические маркеры выделены в разрезах многих скважин на территории Пермского края.

Воробьевский горизонт (толща) выделен А.И. Ляшенко [5] в разрезе скв. 86 (инт. 147–167 м), пробуренной у с. Воробьевка Воронежская области, на восточном склоне Воронежской антеклизы. Подробная палеонтологическая характеристика (брахиоподы, тентакулиты, споры) приведена в монографиях [6, 7].

Горизонт распространен в центральной части Пермского края. Он представлен гравелитами с железистыми оолитами в основании, вверх по разрезу отложения грубообломочной базальной пачки сменяются алевро-песчаными породами, а затем переслаиванием алевролитов с аргиллитами. На западе территории Пермского края разрез горизонта более песчаный. Грубообломочные разности приурочены к зоне выклинивания отложений. Для

них характерна плохая сортировка материала, наличие каолинита, растительных остатков и другие признаки, свидетельствующие о существовании коры выветривания латеритного типа. Мощность терригенных отложений изменяется от первых метров до 12 м [8].

Ардатовский горизонт (слои, свита) выделен М.Ф. Микрюковым и К.Р. Тимергазиным [9] в Западной Башкирии (скв. 1 Ардатовская, инт. 1700–1721 м). Другие исследователи [6] выделяли этот интервал как старооскольский горизонт.

Границы распространения отложений ардатовского горизонта несколько шире, чем воробьевского. Контакт с нижележащими разновозрастными породами скользящий. Литологический состав пород по большей части сходен с воробьевскими, но отличается отсутствием в разрезе значительного количества гидроокислов железа. Основной зоной скопления песчаных толщ являются западные районы территории, где они практически полностью слагают разрез горизонта. В восточном направлении мощность и выдержанность песчаников снижается. Единая песчаная толща разделяется на 2 пласта и в некоторых разрезах восточных площадей замещается глинисто-алевролитовыми породами. Для отложений древних прибрежных зон характерно наличие грубозернистого материала в основании горизонта, каолинитового цемента, растительного детрита, железистых оолитов. Воробьевский горизонт прослеживается не во всех разрезах и часто бывает неотделим от вышележащего ардатовского горизонта (воробьевско-ардатовский интервал). Мощность изменяется от первых метров до 20 м.

Муллинский горизонт (слои) выделен по разрезам скважин 100, 158 и 396 Туймазинского нефтяного месторождения у с. Муллино (Башкирия) коллективом авторов [10]. А.И. Ляшенко [5] выделял эти отложения как розаевский горизонт.

Границы бассейна осадконакопления муллинского времени картируются несколько уже, чем ардатовского. Литологический состав представлен переслаиванием песчаников, алевролитов, аргиллитов, нередко с оолитами, гнездами и прослоями шамозит-гидрогетит-лептохлорит-сидеритовых руд. Характерной особенностью является значительное распространение глинистых осадков, особенно в позднемуллинское время. Основная зона накопления песчаного материала по-прежнему сохраняется на западе, где мощность песчаников в разрезах достигает 14–18 м. Значительные по толщине песчаные пласты зафиксированы в центральных районах и на севере (около г. Соликамска). Характерной особенностью муллинского разреза является наличие в его основании выдержанного песчаного пласта, перекрытого аргиллитом-алевролитовой пачкой, выполняющей функции

флюидоупора. В западном направлении происходит замещение этой пачки алевро-песчаными породами, что приводит к слиянию песчаников муллинского горизонта с нижнефранскими. На остальной части территории состав горизонта преимущественно алевролитовый с прослоями песчаников в основании и аргиллитов в кровле. На локальных участках разрез представлен только аргиллитами. В зоне передовых надвигов Урала отложения практически отсутствуют. Мощность изменяется от первых метров до 25 м.

В современной конодонтовой шкале граница муллинского горизонта проведена внутри конодонтовой зоны *Lower Mesotaxis falsiovalis* [11] или внутри зоны *Lowermost asymmetricus* [12, 13], выше последнего появления *Skeletognathus norrisi* (Uyeno). На Восточно-Европейской платформе и, в частности, в пределах Волго-Уральского субрегиона вопросы о границе среднего и верхнего девона и стратиграфическом положении пашийского и тиманского горизонтов длительное время остаются предметом дискуссий. В унифицированной стратиграфической схеме Русской платформы [1] рассматриваемая граница принята в основании пашийского горизонта и отвечает подошве зоны *hermanni-cristatus*. Ряд исследователей коррелируют нижнюю границу верхнего отдела с основанием верхнетиманского подгоризонта (обзор в работе [14]). Данная точка зрения нашла свое отражение в Постановлениях МСК [2], но не получила формального подтверждения. В.С. Цыганко [15] вышеозначенную границу проводит в основании саргавского горизонта. По мнению Н.К. Фортунатовой [16], ее целесообразно совместить с подошвой тиманского горизонта. Последний уровень границы принят в данной работе, и, таким образом, пашийский горизонт отнесен к среднему отделу девонской системы.

Пашийский горизонт (свита) выделен А.К. Белосусовым [17] на западном склоне Среднего Урала (Архангело-Пашийский район). В стратиграфической схеме девона Русской платформы [1] принят в объеме отраденских и гайнинских слоев. На основе зонального расчленения по споро-пыльцевым комплексам Р.М. Араслановой удалось обособить характеристики пашийского и тиманского горизонтов на уровне подзон [4, 18]. Из них две нижние подзоны (снизу вверх) *Humenozonotriletes incisus* и *Archaeoperisaccus verrucosus* соответствуют пашийскому горизонту, верхняя подзона обильной *Archaeozonotriletes variabilis* – тиманскому горизонту [1].

Литологически породы подгоризонта представлены преимущественно светло-серыми песчаниками, алевролитами с подчиненными прослоями аргиллитов. Отложения верхнепашийского подгоризонта повсеместно отличаются от нижнепашийских

более глинистым составом, увеличением количества остатков ископаемых организмов. Разрез слабают переслаивающиеся алевролиты, мелкозернистые отсортированные кварцевые песчаники и аргиллиты. По простиранию литологические разно-сти замещают друг друга в разных соотношениях даже в пределах небольших территорий. Мощность изменяется от первых метров до 30 м [19].

Фактический материал и методы исследования

Работа выполнена на основе исследований терригенных отложений нерасчлененной толщи воробьевско-ардатовского и пашийского горизонтов живетского яруса среднего отдела девонской системы, изученных в разрезе скв. Широковская 2. Скважина пробурена на Берестянском поднятии, расположенном в районе сочленения Косьвинско-Чусовской седловины Предуральского краевого прогиба и передовых надвигов Западно-Уральской зоны складчатости (Гремячинский р-н Пермского края).

Вынос керна составил 20 м в изучаемом интервале, что соответствует 100 %. Основой для работы послужили результаты геофизического исследования скважин, а именно гамма-каротаж (ГК), нейтронный гамма-каротаж (НГК) и акустический каротаж (ДТ). Данный материал позволил провести стратиграфическую увязку керна, при которой авторы руководствовались результатам литологического описания керна и палинологических исследований, проведенных в опорной скв. Широковская 1 [20] пробуренной рядом. Схема корреляции скважин приведена на рис. 1.

Отложения эйфельского яруса представлены аргиллитами зеленовато-серыми, тонкослоистыми, хрупкими. Выше по разрезу с несогласием залегают песчаники живетского (воробьевско-ардатовский интервал) яруса в интервале 2404,2–2417,4 м. Далее по тексту приведено описание разреза снизу вверх.

Слой 1. Песчаники светло-серые, среднезернистые, косослоистые, с редкими тонкими прослоями углистого материала, крепкие. Контакт с нижележащим слоем четкий, волнистый. Мощность 3,5 м.

Слой 2. Песчаники серые, алевроитовые и мелкозернистые, с массивной слоистостью, с прожилками углистого материала, крепкие. Контакт с нижележащим слоем четкий, ровный. Мощность 3,25 м.

Слой 3. Алевролиты серые, мелко-крупнозернистые, тонкослоистые, с прожилками углистого материала, хрупкие. Контакт с нижележащим слоем постепенный, ровный. Мощность 0,75 м.

Слой 4. Песчаники светло-серые, алевроитистые и средне-мелкозернистые, с массивной слоистостью, в верхней части слоя со слабоволнистой слоистостью, с прожилками углистого материала, крепкие. Контакт с нижележащим слоем четкий, ровный. Мощность 3,25 м.

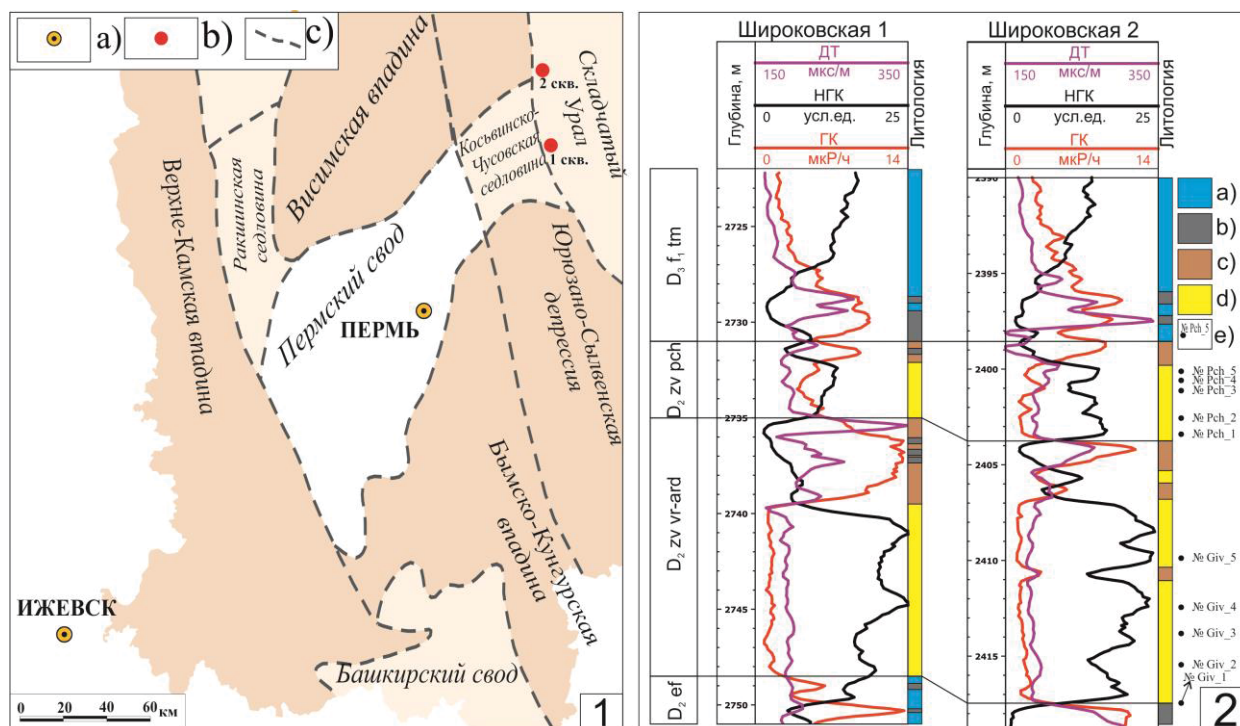


Рис. 1. Местоположение изученной скважины на тектонической схеме Пермского края (1) и схема корреляции изученного разреза скважины Широковская 2 и опорного разреза скважины Широковская 1 (2). Условные обозначения рис. (1): а) города; б) скважины; в) границы тектонических структур. Условные обозначения к рис. (2): а) карбонатные породы; б) аргиллиты; в) алевролиты; д) песчаники; е) точки отбора проб и их номер

Fig. 1. Location of the studied well on the tectonic scheme of the Perm Krai (1) and correlation diagram of the studied section of the Shirokovskaya 2 well and the reference section of the Shirokovskaya 1 well (2). Symbols for figure (1): a) cities; b) wells; c) boundaries of tectonic structures. Symbols for figure (2): a) carbonate rocks; b) argillites; c) siltstones; d) sandstones; e) sampling points and their number

Слой 5. Алевролиты серые, мелко-крупнозернистые, тонкослоистые, хрупкие. Контакт с нижележащим слоем постепенный, ровный. Мощность 1 м.

Слой 6. Песчаники светло-серые, алевролитистые и мелко-среднезернистые, с пологой слоистостью, крепкие. Контакт с нижележащим слоем четкий, ровный. Мощность 0,75 м.

Слой 7. Алевролиты глинистые, темно-серые, мелкозернистые, тонко-среднеслоистые, крепкие. Присутствуют волнистые прожилки темно-зеленого глинистого материала и песчаника мелко-среднезернистого. Контакт с нижележащим слоем постепенный, ровный. Мощность 1,5 м.

Посредством детальной межскважинной корреляции по материалам ГИС [21] выполнено сопоставление описанного интервала с интервалом распространения отложений живетского яруса в разрезе скважины Широковская 1 [20], в которой выполнены палинологические исследования, позволившие определить стратиграфические границы. В Широковской 1 воробьевско-ардатовский горизонт выделен на глубине 2735,0–2748,5 м. Нижняя граница определена на основании смены известняков с афонинским комплексом микрофауны (*Acanthotriletes impolitus* Naum.; *Archaeozonotriletes* cf. *villosus* Tsch-

ibr.; *A. optivus* var. *vorobjensis* Tschibr.; *Hymenozonotriletes tichonovitschi* Rask.) на терригенные породы с воробьевско-ардатовским спорово-пыльцевым комплексом (*Schizophoria* cf. *bistriata*; *Sch. striatula*; *Schuchertella umbraculum*; *Desquamatia desquamata*; *D. frequens* Tjzh.; *Spinatrypa aspera*; *Emanuella takwanensis*; *E. subumbona* var. *iralica* Tjzh.) [20].

В скважине Широковская 2 пашийский горизонт выделен в интервале 2398,5–2403,8 м.

Слой 8. Песчаники алевролитистые мелко-средне- и средне-мелкозернистые, с косой слоистостью, с прожилками углистого материала, крепкие. Контакт с нижележащим слоем четкий, волнистый. Мощность 4 м.

Слой 9. Аргиллиты светло-зеленовато-серые, микро- и тонкослоистые, хрупкие. Мощность 1,35 м.

В разрезе скважины Широковская 1 в терригенных породах определен споро-пыльцевой комплекс *Archaeozonotriletes optivus* – *Hymenozonotriletes krestovnikovi* [20]. Он выделяется в интервале 2731–2735 м, в котором граница между пашийским и воробьевско-ардатовским горизонтом выделяется по смене серых песчаников и алевролитов на зеленовато-серые алевролиты и аргиллиты, охарактеризованные пашийским комплексом спор [20].

Тиманский горизонт в разрезе скважины Широковская 2 выделен в интервале 2403,8 м и выше. Верхняя граница горизонта керном не охарактеризована. Представлен известняками серыми, скрыто-микросталлическими, массивными с обильными включениями раковин брахиопод. Граница с нижележащим пашийским горизонтом выделена на основании сопоставления по ГИС со скважиной Широковская 1, в которой, в свою очередь, данная граница выделена по межскважинной корреляции по ГИС с разрезом Вильвенской скважины 70, где тиманский горизонт сходного строения и литологии датирован тиманской фауной [20].

Петрографическое изучение шлифов проведено на поляризационном микроскопе Olympus BX51 (Япония) в проходящем свете с использованием методов скрещенных николей. Кроме этого, были сделаны снимки шлифов в проходящем свете и в скрещенных николях при увеличении 50× и 100× (аналитик Е.М. Томила).

Исследования минерального состава пород и глинистой фракции проводились с помощью рентгеновского дифрактометра XRD-6000 (Shimadzu). Общий минеральный состав определялся по дифрактограммам истертых до порошка валовых проб. Глинистая фракция выделялась седиментационным способом после предварительной обработки 10 % раствором уксусной кислоты для удаления карбонатного цемента. Для диагностики основных групп глинистых минералов полученные после осаждения на стекла ориентированные препараты исследовались в воздушно-сухом состоянии после насыщения этиленгликолем, прокаливании при температурах 350 и 550 °С, обработки 10 % раствором теплой соляной кислоты [22]. Содержания минералов в валовых пробах определялись с помощью метода Ритвелда [23] в программе Topas 5.0. Соотношения минералов в глинистой фракции рассчитывались по интегральным интенсивностям основных диагностических отражений с использованием корундовых коэффициентов (аналитик Г.А. Исаева).

Содержания породообразующих оксидов определялись рентгенофлуоресцентным методом на спектрометре S8 Tiger (Bruker) (аналитик И.С. Федотов) [24]. Для анализа породообразующих элементов изготавливались стеклообразные диски путем плавления гомогенизированной смеси порошка из прокаленного материала пробы с боратами лития при температуре 1100 °С в платиновых тиглях в печи индукционного плавления. Анализ примесных и микропримесных элементов (с содержанием <5 %) проведен с использованием аттестованной методики определения элементов методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой согласно методике СТО ТГУ 048-2012 (аналитики

Е.С. Рабцевич). Пределы обнаружения следовых количеств элементов составляют 0,001 г/т. Анализ выполнен методом ICP-MS на квадрупольном масс-спектрометре Agilent 7500cx (Agilent Technologies Inc., США) с использованием внутреннего стандарта (In Internal standard, Inorganic Ventures, США) и внешнего стандарта СГД-2А (ГСО 8670-2005). Определения микроэлементного состава пород выполнены на оборудовании Томского регионального центра коллективного пользования Национального исследовательского Томского государственного университета.

Петрографическое описание шлифов

Минеральный состав терригенных пород пашийского горизонта в соответствии с классификацией по Н.В. Логвиненко [25] отвечает полевошпат-кварцевым песчаниками (рис. 2).

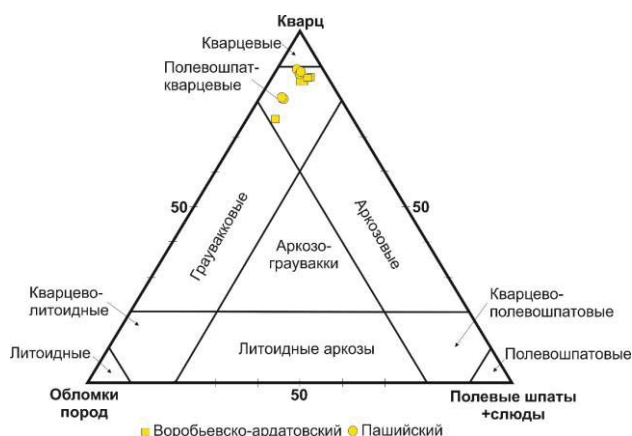


Рис. 2. Классификационные диаграммы для терригенных пород воробьевско-ардатовского и пашийского горизонтов [25]

Fig. 2. Classification diagrams for terrigenous rocks of the Vorobyevsky-Ardatov and Pashysky horizons according to [25]

Снизу вверх по разрезу степень сортировки изменяется от средней до хорошей. Хорошая сортировка преобладает в большинстве образцов. Окатанность обломочного материала практически не изменяется, преобладают полуокатанные обломки. Структура псаммитовая, алевропсаммитовая, размер зерен изменяется от 0,02 до 0,4 мм, преобладают зерна 0,18–0,22 мм. Среди обломков различаются полуокатанные (70–80 %), неокатанные (5 %), отмечаются окатанные обломки (15–20 %) (рис. 3, А).

Для пород характерен смешанный тип цемента. В песчаниках присутствует бесцементное контактное соединение зерен кварца и обломков, которое характеризуется конформной структурой (рис. 3, В), а также обнаруживается поровый карбонатный и сульфатный цемент.

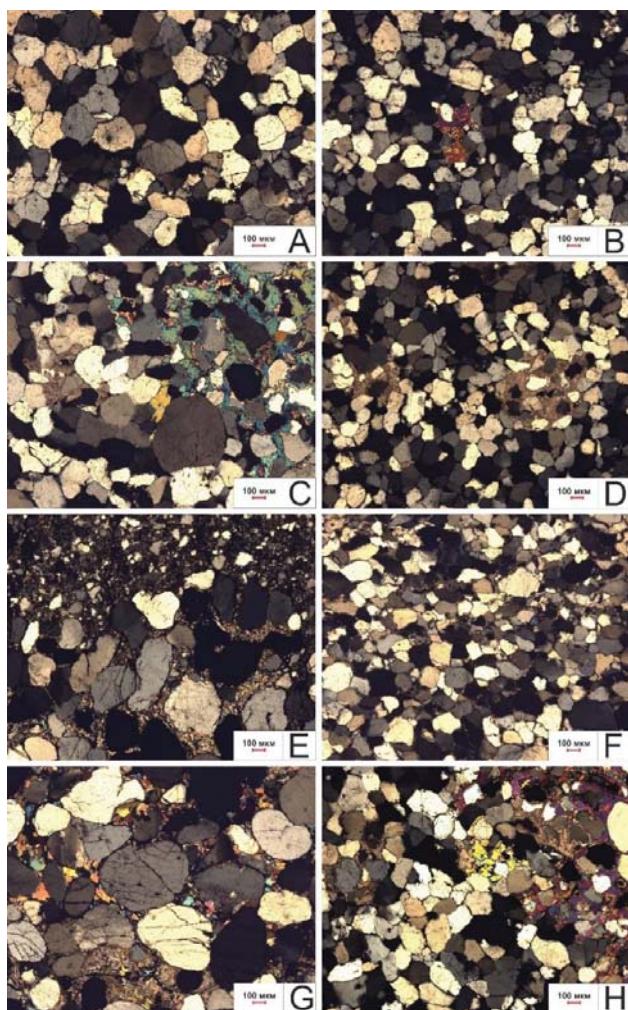


Рис. 3. Микрофотографии шлифов терригенных пород пашийского (А–Д) и воробьевско-ардаатовского (Е–Г) горизонтов (никколи скрещены): А) песчаник алевритистый средне-мелкозернистый полевошпат-кварцевый; В) бесцементное контактное или регенерационное кварцевое соединение зерен с формированием конформных контактов; С) поровый сульфатный цемент, который образует пойкилитовую структуру; Д) поровый карбонатный цемент; Е) линзовидная прослойка глинистого алевролита размером 2×1,5 мм в среднезернистом песчанике; F) песчаник алевритовый мелкозернистый кварцевый с порово-пленочным глинистым цементом; Г) песчаник среднезернистый кварцевый с поровым сульфатным цементом; Н) поровый карбонатный и сульфатный цемент; карбонатная составляющая цемента представлена кристаллами кальцита, а сульфатная – ангидритом, образуя пойкилитовую структуру

Fig. 3. Micrographs of thin sections of terrigenous rocks of the Pashysky (A–D) and Vorobyevsky-Ardatov (E–G) horizons (crossed nicols): A) silty medium-fine-grained feldspar-quartz sandstone; B) cementless contact or regeneration quartz joint of grains with the formation of conformal contacts; C) pore sulfate cement that form poikilitic structures; D) porous carbonate cement; E) lenticular layer of clayey siltstone 2×1.5 mm in size in medium-grained sandstone; F) silty fine-grained quartz sandstone with porous-film clayey cement; G) medium-grained quartz sandstone with porous sulfate cement; H) pore carbonate and sulfate cement; the carbonate component of cement is represented by calcite crystals, and sulfate component is represented by anhydrite, forming a poikilitic structure

Карбонатная составляющая цемента представлена кальцитом, а сульфатная – ангидритом, которые образуют пойкилитовую структуру, чаще всего сульфатный цемент преобладает (рис. 3, C, D). В единичных случаях в отдельных порах развивается каолинит с редкой примесью гидрослюда. Средний минеральный состав пород пашийского горизонта: кварц (~86 %), полевые шпаты (~6 %) и обломки пород различного генезиса (~8 %). Обломки пород представлены кварцитами глинистого и кремневого состава. В породах диагностированы минералы, характерные для магматических пород кислого и основного состава: циркон, сфен, лейкоксен, амфиболы и пироксены (рис. 4).

Фигуративные точки изученных пород воробьевско-ардаатовского горизонта на классификационной диаграмме Н.В. Логвиненко также расположились в поле значений полевошпат-кварцевых песчаников. Снизу вверх по разрезу степень сортировки чередуется от хорошей до средней. Окатанность обломочного материала изменяется от окатанных до полуокатанных обломков. Внизу разреза наблюдается единичная линзовидная прослойка глинистого алевролита размером 2×1,5 мм (рис. 3, E).

Структура псаммитовая, алевропсаммитовая, размер зерен изменяется от 0,02 до 0,6 мм, преобладают зерна 0,15–0,3 мм. Среди обломков различаются полуокатанные (30–80 %), окатанные (15–65 %) и неокатанные (5 %) обломки (рис. 3, F).

Для пород характерен поровый карбонатный и сульфатный цемент (рис. 3, G). Карбонатная составляющая цемента представлена кальцитом, а сульфатная – ангидритом, которые образуют пойкилитовую структуру. Сульфатный цемент преобладает. Также наблюдается пленочно-поровый глинистый, гидрослюдистого состава (рис. 3, H) и бесцементное контактное или регенерационное кварцевое соединение зёрен с формированием конформных контактов. В порах развивается каолинит, чаще всего плохо раскристаллизованный. Так, средний минеральный состав пород воробьевско-ардаатовского горизонта таков: кварц (~82 %), полевые шпаты (~8 %) и обломки пород различного генезиса (~10 %). Последние представлены кварцитами, гранитоидами и кремневыми породами. В породах диагностированы минералы, характерные для магматических пород кислого и основного состава: циркон, турмалин, сфен, лейкоксен, амфиболы (рис. 4).

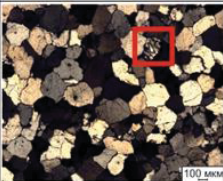
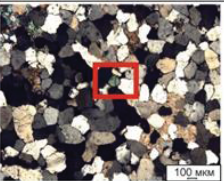
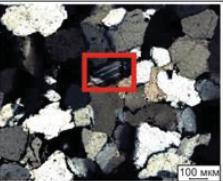
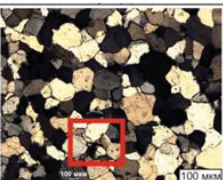
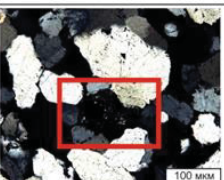
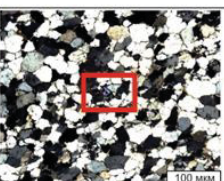
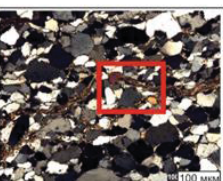
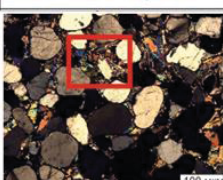
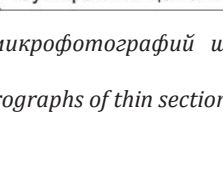
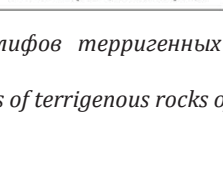
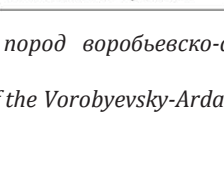
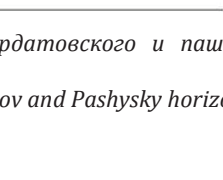
Горизонт	Порода				
Пашийский	Олигомиктовые (полевошпат-кварцевый) песчаники				
		Обломок кварцита	Сульфатный цемент	Обломок пироксена	Обломок полевого шпата
					
		Обломок циркона	Регенерация кварца	Каолинит	
					
		Обломок кварцита	Обломок гранитоида	Обломок циркона	Обломки пироксена и амфибола
Воробьевско-ардатовский	Олигомиктовые (полевошпат-кварцевый) песчаники				
		Сульфатный цемент	Регенерация кварца	Глинистый цемент	
					

Рис. 4. Фототаблица микрофотографий шлифов терригенных пород воробьевско-ардатовского и пашийского горизонтов

Fig. 4. Phototable of micrographs of thin sections of terrigenous rocks of the Vorobyevsky-Ardatov and Pashysky horizons

Петрогенные оксиды

Содержания петрогенных оксидов и рассчитанные значения основных химических индексов CIA и ICV [26] приведены в таблице.

Воробьевско-ардатовский горизонт. Содержания оксидов в терригенных породах варьируется в пределах: $\text{SiO}_2=64,8\text{--}91,3$, $\text{TiO}_2=\text{до } 0,1$, $\text{Al}_2\text{O}_3=0,66\text{--}1,12$, $\text{Fe}_2\text{O}_3=\text{до } 0,75$, $\text{MgO}=0,22\text{--}0,88$, $\text{CaO}=2,1\text{--}12,8$, $\text{Na}_2\text{O}=\text{до } 0,1$, $\text{K}_2\text{O}=\text{до } 0,13$ мас. %. На классификационной диаграмме Ф. Петтиджона [27] фигуративные точки состава песчаников располагаются в поле сублитаренитов и кварцевых арениитов (рис. 5, А). На диаграмме (рис. 5, В) видно, что песчанки получили значения CIA (7,8–24,6) и ICV (4,45–12,6) и расположены в поле незрелых слабыветрелых пород.

Пашийский горизонт. Содержания оксидов в песчаниках варьируют в пределах: $\text{SiO}_2=94,2\text{--}96,3$, $\text{TiO}_2=\text{до } 0,13$, $\text{Al}_2\text{O}_3=0,6\text{--}1,57$, $\text{Fe}_2\text{O}_3=0,15\text{--}0,45$, $\text{MgO}=0,15\text{--}0,45$, $\text{CaO}=0,1\text{--}0,7$, $\text{Na}_2\text{O}=\text{до } 0,15$, $\text{K}_2\text{O}=\text{до } 0,31$ мас. %. На классификационной диаграмме Ф. Петтиджона фигуративные точки состава песчаников располагаются в поле сублитарени-

тов и кварцевых арениитов (рис. 5, А). На диаграмме (рис. 5, В) видно, что песчаники получили значения CIA (Chemical Index of Alteration – индекс химического выветривания) (50,8–77,5) и ICV (Index of Compositional Variability – индекс зрелости осадков) (0,68–1,97) и расположены в поле зрелых и незрелых слабыветрелых пород.

Редкоземельные элементы

Содержания редкоземельных элементов (РЗЭ) в изученных образцах представлены в таблице. Для наглядного представления особенностей распределения этих элементов проведено их нормирование на хондрит [28] (рис. 5, С–D).

Для пород воробьевско-ардатовского горизонта обнаруживаются фракционированные спектры распределения РЗЭ ($\text{Lan/Ybn}=6,87\text{--}17,64$) и обогащение легкими лантаноидами ($\text{Lan/Smn}=3,37\text{--}4,30$) относительно тяжелых ($\text{Gdn/Ybn}=1,24\text{--}2,17$). На спектрах распределения РЗЭ фиксируется ярко выраженная отрицательная европиевая аномалия ($\text{Eu/Eu}^*=0,15\text{--}0,62$) (рис. 5, D).

Таблица. Петрохимический состав и содержания редких и редкоземельных элементов в песчаниках воробьевско-ардатовского и пашийского горизонтов

Table. Petrochemical composition and content of rare and rare earth elements in sandstones of the Vorobyevsky-Ardatov and Pashysky horizons

Лабораторный номер Laboratory number	Psh-1	Psh-2	Psh-3	Psh-4	Psh-5	Giv-6	Giv-7	Giv-8	Giv-9	Giv-10
Глубина, м Depth, m	2403,6	2403,9	2404,4	2406,5	2407,4	2410,6	2412,8	2414,2	2415,8	2417,9
%	Пашийский горизонт Pashysky horizon					Воробьевско-ардатовский горизонт Vorobyevsky-Ardatov horizon				
SiO ₂	94,2	96,2	94,2	95,2	96,3	64,4	91,3	90,6	88,0	64,8
TiO ₂	0,09	0,06	0,12	0,13	0,13	0,03	0,08	0,08	0,10	0,07
Al ₂ O ₃	0,95	0,60	1,24	1,57	1,10	0,97	0,73	0,66	0,81	1,12
Fe ₂ O ₃	0,41	0,15	0,45	0,19	0,15	0,07	0,27	0,26	0,41	0,75
MnO	0,16	0,09	0,08	0,12	0,11	0,17	0,09	0,09	0,12	0,14
MgO	0,45	0,24	0,18	0,20	0,15	0,28	0,66	0,63	0,88	0,22
CaO	0,70	0,38	0,76	0,15	0,13	11,30	2,07	2,46	3,10	12,80
Na ₂ O	0,15	0,02	0,08	0,09	0,08	0,07	0,09	0,08	0,08	0,10
K ₂ O	0,07	0,04	0,16	0,31	0,11	0,05	0,08	0,08	0,08	0,13
P ₂ O ₅	0,04	0,03	0,05	0,04	0,03	0,03	0,03	0,04	0,03	0,04
SO ₃	0,44	0,30	0,85	0,14	0,15	15,81	1,79	2,32	2,79	17,53
П.П.П.	1,19	0,83	0,78	0,74	0,52	5,58	1,74	1,65	2,42	1,06
Сумма	98,82	98,94	98,96	98,88	98,91	98,80	98,96	98,90	98,86	98,74
Na ₂ O/K ₂ O	2,14	0,50	0,50	0,29	0,73	1,40	1,13	1,00	1,00	0,77
SiO ₂ /Al ₂ O ₃	99,2	160,4	76,0	60,6	87,5	66,4	125,1	137,2	108,7	57,9
CIA	50,8	57,7	55,4	74,1	77,5	7,8	24,6	20,1	19,9	7,9
ICV	1,97	1,48	1,41	0,68	0,68	12,2	4,45	5,44	5,74	12,6
ppm										
La	5,34	4,44	5,81	5,83	4,83	3,30	6,38	5,97	5,56	4,78
Ce	9,54	8,74	10,70	10,76	8,96	6,36	10,91	10,16	9,97	9,42
Pr	1,26	1,11	1,51	1,47	1,00	0,72	1,37	1,29	1,27	1,21
Nd	5,28	4,63	6,74	6,21	3,55	2,61	5,16	4,85	4,86	4,57
Sm	1,20	1,07	2,15	1,37	0,71	0,48	0,95	0,90	0,98	0,89
Eu	0,21	0,17	0,48	0,22	0,12	0,08	0,15	0,14	0,04	0,14
Gd	0,96	0,73	2,42	0,95	0,64	0,34	0,74	0,72	0,84	0,71
Tb	0,14	0,10	0,36	0,14	0,11	0,05	0,12	0,12	0,14	0,13
Dy	0,72	0,48	1,59	0,68	0,59	0,22	0,62	0,61	0,74	0,60
Ho	0,15	0,10	0,33	0,14	0,14	0,04	0,14	0,13	0,17	0,15
Er	0,40	0,28	0,77	0,38	0,37	0,11	0,36	0,40	0,46	0,40
Tm	0,05	0,03	0,08	0,05	0,05	0,01	0,05	0,05	0,06	0,05
Yb	0,42	0,28	0,74	0,43	0,43	0,13	0,43	0,43	0,55	0,38
Lu	0,05	0,04	0,09	0,06	0,06	0,02	0,05	0,06	0,07	0,05
Sc	0,62	0,51	1,03	1,34	0,62	0,26	0,56	0,55	0,87	1,63
Zr	31,10	21,10	39,19	33,77	30,85	6,48	32,53	35,19	45,52	11,19
Th	0,99	0,69	1,39	1,12	0,97	0,48	0,99	1,10	1,19	1,39
(La/Yb) _n	8,53	10,80	5,27	9,18	7,55	17,64	9,97	9,37	6,87	8,58
(La/Sm) _n	2,81	2,62	1,70	2,68	4,25	4,30	4,24	4,18	3,56	3,37
(Gd/Yb) _n	1,83	2,13	2,63	1,78	1,20	2,17	1,38	1,36	1,24	1,52
Eu/Eu*	0,60	0,57	0,65	0,58	0,53	0,62	0,56	0,54	0,15	0,54
Th/Sc	1,60	1,35	1,35	0,84	1,56	1,85	1,77	2,00	1,37	0,85
Zr/Sc	50,16	41,37	38,05	25,20	49,76	24,92	58,09	63,98	52,32	6,87

Примечания: CIA=[Al₂O₃/(Al₂O₃+CaO+Na₂O+K₂O)]×100; ICV=(TiO₂+Fe₂O₃+MnO+MgO+CaO+K₂O+Na₂O)/Al₂O₃;
Eu/Eu* = (Eun)/((Smn)×(Gdn))^{1/2}; (La/Yb)_n, (La/Sm)_n (Ga/Yb)_n – отношения, нормированные по хондриту [28].
Note: CIA=[Al₂O₃/(Al₂O₃+CaO+Na₂O+K₂O)]×100; ICV=(TiO₂+Fe₂O₃+MnO+MgO+CaO+K₂O+Na₂O)/Al₂O₃;
Eu/Eu* = (Eun)/((Smn)×(Gdn))^{1/2}; (La/Yb)_n, (La/Sm)_n (Ga/Yb)_n ratios normalized by chondrite [28].

Для пород пашийского горизонта обнаруживаются фракционированные спектры распределения РЗЭ (Lan/Ybn=5,27–10,80) и обогащение легкими лантаноидами (Lan/Smn=1,70–4,25) относительно тяжелых (Gdn/Ybn=1,20–2,63). На спектрах распределения РЗЭ фиксируется слабо выраженная отрицательная европиевая аномалия (Eu/Eu*=0,53–0,65) (рис. 5, С).

Обсуждение результатов

Генетическая типизация терригенных пород живетского яруса, проведенная с использованием системы индексов CIA/ICV [26], позволила аттестовать песчаники воробьевско-ардатовского горизонта как незрелые осадки первого цикла седиментации (рис. 5, В), т. е. породы, образованные за счет разрушения первично-магматических и метаморфических пород.

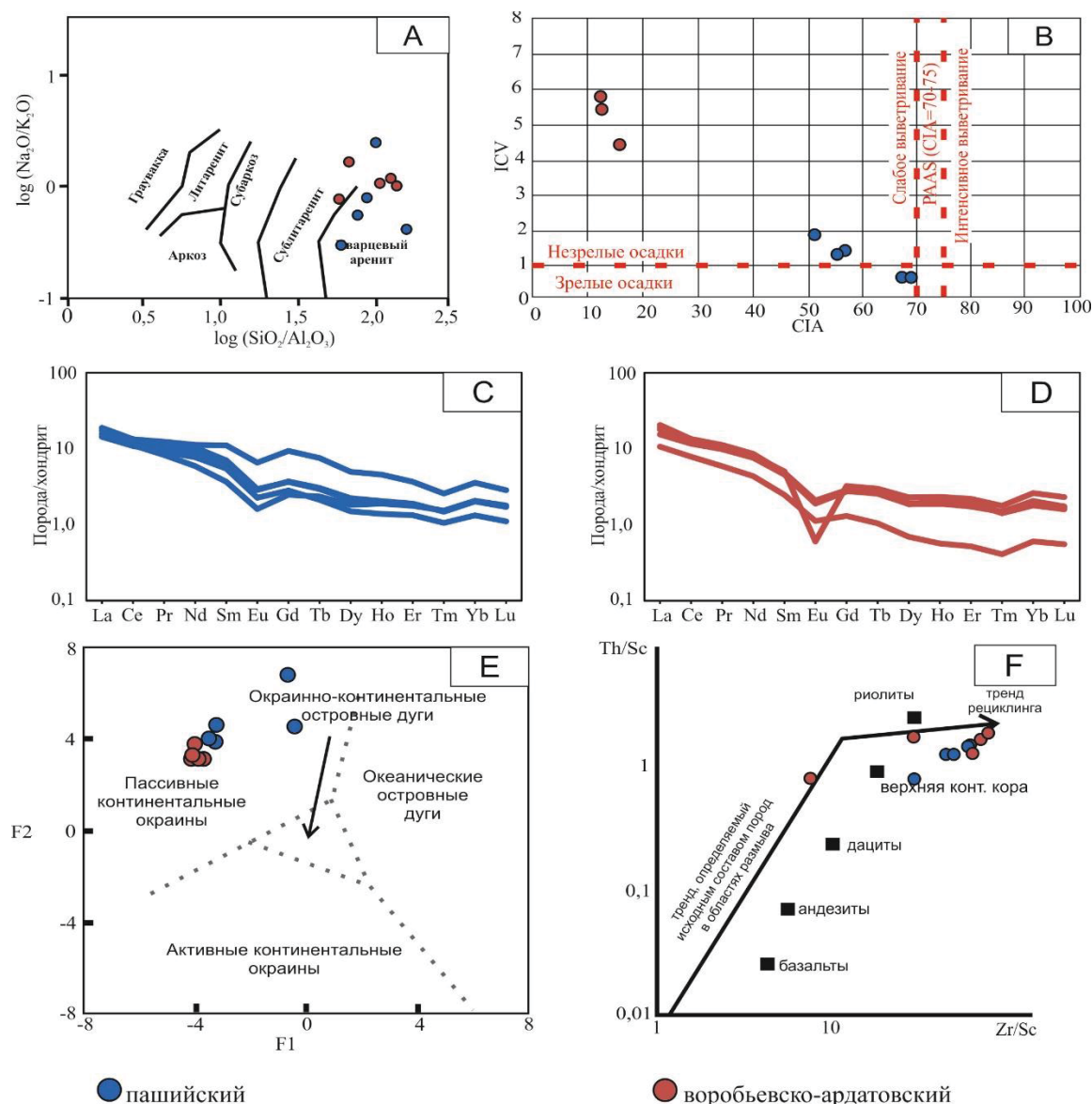


Рис. 5. Положение фигуративных точек на диаграммах (А) [27]; диаграмма CIA [31]/ICV (В) [26]; спектры распределения РЗЭ (С), нормированные по хондриту [28]; палеогеодинамическая дискриминационная диаграмма F1–F2 М. Бхатии (D) [29]; дискриминационные диаграммы для определения состава источника сноса; (Е) диаграмма Zr/Sc–Th/Sc [30]

Fig. 5. Position of figurative points on diagrams (A) [27]; chart CIA [31]/ICV (B) [26]; REE distribution spectra (C) normalized to chondrite [28]; paleogeodynamic discrimination diagram F1–F2 of M. Bhatia (D) [29]; discrimination diagrams for determining the composition of the drift source; (E) Zr/Sc–Th/Sc diagram [30]

Фигуративные точки состава терригенных пород пашийского горизонта расположились в поле осадков первого и второго цикла седиментации (рис. 5, В) слабовыветрелых пород.

По результатам проведенных исследований изученные породы разделились на две естественные группы.

К первой группе относятся породы воробьевско-ардатовского горизонта, которые характеризуются хорошей и средней степенью сортировки и окатанности. Эти породы преимущественно полевошпат-кварцевые с обломками пород различного

генезиса (~9 %). Анализ обломочной части и акцессорных минералов показал, что в области источника разрушались преимущественно магматические и метаморфические породы кислого состава. При этом присутствуют минералы-индикаторы пород основного состава. Для этой группы пород фиксируется наличие отрицательной европиевой аномалии. Таким образом, характер распределения спектров РЗЭ подтверждает сделанные выводы по результатам петрографических исследований о преимущественно кислом составе пород в области источника сноса.

Ко второй группе относятся породы пашийского горизонта, которые характеризуются хорошей и средней степенью сортировки и окатанности. Эти породы преимущественно полевошпат-кварцевого состава с обломками пород (~8 %). Анализ обломочной части и минералов тяжелой фракции показал, что в области источника разрушались магматические породы кислого и основного составов и метаморфические породы. Для этой группы пород фиксируется наличие отрицательной европиевой аномалии. Таким образом, мы можем предположить, что для пород воробьевско-ардамовского горизонта в области источника сноса разрушались преимущественно породы кислого состава. При этом имел место источник основного состава.

Присущие терригенным породам воробьевско-ардамовского и пашийского горизонтов значения отношений Zr/Sc и Th/Sc указывают, в соответствии с представлениями [30], на то, что в их составе доминирует материал первого и второго цикла седиментации, источником которого были магматические породы преимущественно кислого состава (рис. 5, F).

Контакт терригенных пород живетского и нижежащих карбонатных пород эйфельского яруса фиксирует поверхность стратиграфического несогласия. Эрозионное событие на Восточно-Европейской платформе в целом совпадает со временем глобальной регрессии [31]. Живетский век начался с трансгрессии. Область седиментации живетского века представляла собой внутриконтинентальный бассейн, открытый в сторону Уральского палеоокеана. Основным источником поставки обломочного материала здесь являлась древняя суша на севере, объединявшая Коми-Пермяцкую, Гайнинскую, Ксенофонтово-Ябуровскую приподнятые зоны. С юго-востока материал поставляла Красноуфимская приподнятая зона [8, 31, 32]. Формиро-

вание отложений происходило в переходных условиях осадконакопления, существовала обдирная дельтовая система [33–40].

Накопление пород шло в обстановках пассивной континентальной окраины, что подтверждается расположением фигуративных точек на палеогеодинамической диаграмме [29] (рис. 5, E).

Заключение

В результате проведенных исследований выполнено послойное литологическое описание живетского интервала разреза в скважине и его сопоставление с соседним разрезом, в котором произведены палинологические исследования и подтвержден и обоснован возраст.

Формирование терригенных отложений живетского яруса происходило в переходных обстановках осадконакопления на обширной дельтовой равнине.

Песчаники воробьевско-ардамовского интервала являются петрогенными, образованными за счет разрушения первично-магматических и метаморфических пород преимущественно кислого и основного состава. Песчаники пашийского горизонта лито- и петрогенные. В области источника разрушались магматические и метаморфические породы кислого и основного составов.

Совокупность вещественных характеристик терригенных пород живетского яруса, с учетом опубликованных данных о литолого-фациальных особенностях этих пород, позволила предположить, что седиментация пород происходила на пассивной континентальной окраине при поступлении обломочного материала за счет размыва как раннее накопленных терригенных пород девона, которые были в экспозиции, так и разрушения выступов фундамента.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Решение межведомственного регионального стратиграфического совещания по среднему и верхнему палеозою Русской платформы, с региональными стратиграфическими схемами. Девонская система. – Л.: ВСЕГЕИ, 1990. – 58 с.
2. Соболев Н.Н., Евдокимова И.О. Девонская система // Постановления Межведомственного стратиграфического комитета и его постоянных комиссий. Состояние изученности стратиграфии докембрия и фанерозоя России. Задачи дальнейших исследований. – СПб: ВСЕГЕИ, 2008. – С. 52–60.
3. Зверева К.А., Кузнецов Ю.И. Геофизическая, литолого-палеонтологическая, характеристика и унификация основных маркирующих горизонтов девонских и каменноугольных отложений Пермского Прикамья // Новые данные о геологическом строении и нефтегазоносности Пермского Прикамья: Тр. КФ ВНИГНИ. – Пермь: Пермское книжн. изд-во, 1966. – Вып. 57. – С. 225–232.
4. Арасланова Р.М. Стратиграфическое распределение спор в терригенных отложениях девона Пермского Прикамья // Геология и нефтегазоносность севера Урало-Поволжья: Тр. ВНИГНИ. – Пермь: Пермское книжн. изд-во, 1973. – Вып. 123. – С. 182–190.
5. Ляшенко А.И. Стратиграфия девонских отложений Волго-Уральской области // Геол. нефти и газа. – 1960. – № 2. – С. 20–24.
6. Нефтегазоносные и перспективные комплексы центральных и восточных областей Русской платформы // Девонские отложения Волго-Уральской нефтегазоносной области. Тр. ВНИГНИ. Вып. 75. – Л.: Недра, 1970. – Т. 2. – 272 с.
7. Тихомиров С.В. Этапы осадконакопления девона Русской платформы и общие вопросы развития и строения стратисферы. – М.: Недра, 1995. – 445 с.
8. Багаев А.Н. Живетские песчаники на севере Пермского края // Нефтегазовая геология. Теория и практика. – 2012. – Т. 7. – № 1. DOI: https://doi.org/10.17353/2070-5379/1_2015 URL: http://www.ngtp.ru/rub/4/14_2012.pdf (дата обращения 15.03.2024).

9. Микрюков М.Ф., Тимергазин К.Р. Новые данные по стратиграфии и литологии терригенных отложений девона Бавлинско-Туймазинского нефтеносного района // Нефт. хоз-во. – 1948. – № 9. – С. 43–53.
10. Стратиграфический словарь СССР. Кембрий, ордовик, силур, девон / под ред. И.Е. Занина, Б.К. Лихарева. – Л.: Недра, 1975. – 622 с.
11. Ziegler W., Sandberg C. The Late Devonian standard conodont zonation // Cour. Forsch.-Inst. Senckenberg. – 1990. – 115 p.
12. Ziegler W. Taxonomie und Phylogenie oberdevonischer conodonten und ihre stratigraphische Bedeutung // Abh. Hess. L.-Amt Bodenf. – 1962. – 166 p.
13. Ziegler W. Conodont stratigraphy of the European Devonian // Geol. Soc. Amer. Mem. – 1971. – Vol. 127. – P. 227–284. DOI: <https://doi.org/10.1130/MEM127-p227>.
14. Унифицированная субрегиональная стратиграфическая схема верхнедевонских отложений Волго-Уральского субрегиона / Н.К. Фортунатова, С.М. Шик, Е.Л. Зайцева и др. – М.: ФГБУ «ВНИГНИ», 2018. – 64 с.
15. Цыганко В.С. Девон западного склона севера Урала и Пай-Хоя (стратиграфия, принципы расчленения, корреляция). – Екатеринбург: УрО РАН, 2011. – 356 с.
16. Фортунатова Н.К., Зайцева Е.Л., Карцева О.А. Строение девонского терригенного комплекса и положение границы среднего и верхнего девона на западе Татарстана // Бюллетень МОИП. Отдел геологический. – 2013. – Т. 88. – Вып. 2. – С. 22–49.
17. Белоусов А.К. Бокситы и диаспор-шамозитовые руды западного склона Южного Урала // Тр. Всесоюз. НИИ минерального сырья. – 1937. – Вып. 112. – С. 70–106.
18. Арасланова Р.М., Сташкова Э.К. Зональное расчленение по спорам нижнефранских отложений и выделение тиманского горизонта в разрезах Пермского Прикамья // Геологическое изучение и использование недр: научно-техн. инф. сб. ООО Геоинформмарк. – М.: ООО Геоинформмарк, 2002. – Вып. 1. – С. 9–20.
19. Багаев А.Н. Франские песчаники на севере Пермского края // Нефтегазовая геология. Теория и практика. – 2015. – Т. 10. – № 1. URL: http://www.ngtp.ru/rub/4/1_2015.pdf (дата обращения 15.03.2024).
20. Геологические результаты бурения Широковской параметрической скважины 1 (Пермская область) / Э.К. Сташкова, С.В. Матяшов, А.В. Паняев, М.Г. Фрик, Г.И. Титова, А.П. Вилесов, В.П. Потапов, Н.Н. Акулова, Н.В. Быкова, И.С. Батова, Р.М. Арасланова, Т.В. Стукова // Геология, методы поисков, разведки и оценки месторождений топливно-энергетического сырья. – М.: ООО «Геоинформмарк», 2004. – 78 с.
21. Методические рекомендации к корреляции разрезов скважин / под ред. И.С. Гутмана. – М.: Недра, 2013. – 112 с.
22. Рентгенография основных типов породообразующих минералов (слоистые и каркасные силикаты) / под ред. В.А. Франк-Каменецкого. – Л.: Недра, 1983. – 359 с.
23. The Rietveld method. International Union of Crystallography / Ed. by R.A. Young. – UK: Oxford University Press, 1993. – 298 p. DOI: <https://doi.org/10.1002/crat.2170300412>.
24. Thomsen V. Basic fundamental parameters in X-ray fluorescence May Spectroscopy // Springfield then Eugene then Duluth. – 2007. – Vol. 22. – № 5. – P. 46–50.
25. Логвиненко Н.В. Петрография осадочных пород (с основами методики исследования). – М.: Высшая школа, 1974. – 400 с.
26. Cox R., Lowe D.R.A. Conceptual review of regional-scale controls on the composition of clastic sediment and the co-evolution of continental blocks and their sedimentary cover // Journal of Sedimentary Research. – 1995. – Vol. 1. – P. 1–12.
27. Pettijohn F.I., Potter P.E., Siever R. Sand and sandstone. – New York: Springer, 1972. – 618 p.
28. Boynton W.V. Geochemistry of the rare earth elements: meteorite studies // Rare earth element geochemistry / Ed. by P. Henderson. – Elsevier, 1984. – P. 63–114. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-444-42148-7.50008-3>.
29. Bhatia M.R. Plate tectonics and geochemical composition of sandstones // J. Geol. – 1983. – Vol. 91. – P. 611–627. DOI: <http://dx.doi.org/10.1086/628815>.
30. Cullers R.L. Implications of elemental concentrations for provenance, redox conditions, and metamorphic studies of shales and limestones near Pueblo, CO, USA // Chem Geol. – 2002. – Vol. 191. – P. 305–327. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(02\)00133-X](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(02)00133-X).
31. Кутуков А.В., Чернышев И.В. О живетско-нижнефранских отложениях платформенной части Пермской области // Геологическое строение и нефтегазоносность Волго-Уральской области и сопредельных районов: Тр. ВНИГНИ. – 1963. – Вып. 36. – С. 121–126.
32. 400 миллионов лет геологической истории южной части Восточной Европы / под ред. Н.В. Межеловского, Н.В. Морозова, А.М. Никишина. – М.: Геокарт, ГЕОС, 2005. – 388 с.
33. Selim S.S. Sedimentology and stratigraphic evolution of fluvial-tidal transition reservoirs: an outcrop analog for the hydrocarbon-bearing Bahariya Formation, Western Desert, Egypt // Journal of Sedimentary Research. – 2023. – Vol. 93. – № 1. – P. 50–70.
34. Paleoenvironmental evolution of an Early Devonian section from Paraná Basin (South of Brazil) based on a multiproxy approach / R.M.A. Gama, K.B. Costa, D.E.S. dos Reis, E. Pereira // J. Sediment. Environ. – 2022. – Vol. 7. – P. 111–123.
35. Bonev N., Chiaradia M., Moritz R. Strontium isotopes reveal Early Devonian to Middle Triassic carbonate sedimentation in the Sakar-Strandzha Zone, SE Bulgaria // Int J Earth Sci (Geol Rundsch). – 2022. – Vol. 111. – P. 1307–1314.
36. The proto-type basin and tectono-paleogeographic evolution of the Tarim basin in the Late Paleozoic / J. Xia, Z. Zhong, S. Huang, C. Luo, H. Lou, H. Chang, X. Li, L. Wei // Front. Earth Sci. – 2023. – Vol. 11. – P. 1–17.
37. Proterozoic–Phanerozoic tectonic evolution of the Qilian Shan and Eastern Kunlun Range, northern Tibet / Chen Wu, Jie Li, A.V. Zuza, P.J. Hapf, Xuanhua Chen, Lin Ding // GSA Bulletin. – 2021. – Vol. 134. – № 9–10. – P. 2179–2205.
38. Waters J., Ausich W. Gennaeocrinus tariatensis, a new Emsian (Devonian) monobathrid crinoid from the Tarvagatay Terrane of Mongolia // Journal of Paleontology. – 2022. – Vol. 96. – № 3. – P. 631–637.
39. Строение и этапы развития осадочного бассейна северо-востока Восточно-Европейской платформы в протерозое и палеозое на основе многолетних наблюдений геологических разрезов и исследований глубоких скважин / А.И. Сулима,

- А.В. Плюснин, Л.Д. Плешков, Я.С. Трубин, В.Д. Тимофеев // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 11. – С. 141–160. DOI: <https://doi.org/10.18799/24131830/2021/11/2928>.
40. Условия осадконакопления, вещественный состав и реконструкция пород питающих провинций отложений визейского яруса Башкирского свода (по результатам изучения керна скважины на юге Пермского края) / А.В. Плюснин, А.И. Сулима, Д.А. Староселец, Е.М. Томилина, Г.А. Исаева, И.В. Афонин, И.С. Федотов, Е.С. Рабцевич, Д.М. Бобров, М.С. Сергеев // Георесурсы. – 2024. – Vol. 26 (1). – С. 52–70. DOI: <https://doi.org/10.18599/grs.2024.1.5>

Информация об авторах

Игорь Викторович Афонин, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории геохронологии и геодинамики, Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия, 634050, Томск, пр. Ленина, 36; heaven05@list.ru; <https://orcid.org/0000-0001-5942-6688>

Алексей Владимирович Плюснин, кандидат геолого-минералогических наук, научный консультант Департамента нефтегазового инжиниринга ПИНШ Альметьевского Государственного Технологического университета «Высшая школа нефти», Россия, 423462, г. Альметьевск, ул. Советская, 186А; a.v.plyusnin@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2386-0287>

Елена Михайловна Томилина, старший преподаватель кафедры минералогии и петрографии Пермского Государственного национального исследовательского университета им. А.М. Горького, Россия, 614990, г. Пермь, ул. Букирева, 15; tomilinaelena.psu@yandex.ru

Евгения Сергеевна Рабцевич, кандидат химических наук, инженер-исследователь испытательного центра «Томский региональный центр коллективного пользования», Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия, 634050, Томск, пр. Ленина, 36; evgenia882-a@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-9275-4453>

Илья Сергеевич Иванов, инженер I категории отдела минералогических исследований филиала ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг» «ПермНИПИнефть» в г. Перми, Россия, 614000, г. Пермь, ул. Академика Королева, 21А; Ija.Ivanov@pnn.lukoil.com

Иван Валентинович Мякшин, инженер I категории отдела петрофизических исследований филиала ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг» «ПермНИПИнефть» в г. Перми, Россия, 614000, г. Пермь, ул. Академика Королева, 21А; Ivan.Myakshin@pnn.lukoil.com

Александр Иванович Сулима, соискатель кафедры региональной и нефтегазовой геологии, Пермский государственный национальный исследовательский университет, Россия, 614000, г. Пермь, ул. Букирева, 15; super.sulima2013@yandex.ru

Поступила в редакцию: 03.04.2024

Поступила после рецензирования: 14.07.2024

Принята к публикации: 24.01.2025

REFERENCES

1. *Resolution of the interdepartmental regional stratigraphic meeting on the Middle and Upper Paleozoic of the Russian Platform, with regional stratigraphic schemes. Devonian system.* Leningrad, VSEGEI Publ., 1990. 58 p. (In Russ.)
2. Sobolev N.N., Evdokimova I.O. *Devonian system. Resolutions of the Interdepartmental Stratigraphic Committee and its standing commissions. The state of knowledge of the stratigraphy of the Precambrian and Phanerozoic of Russia. Objectives for further research.* St Petersburg, VSEGEI Publ., 2008. pp. 52–60. (In Russ.)
3. Zvereva K.A., Kuznetsov Yu.I. Geophysical, lithologic-paleontological, characteristics and unification of the main marker horizons of the Devonian and Carboniferous deposits of the Perm Kama region. *New data on the geological structure and oil and gas content of the Perm Kama region. Tr. KF VNIGNI.* Perm, Perm book Publ. house, 1966. Vol. 57, pp. 225–232. (In Russ.)
4. Araslanova R.M. Stratigraphic distribution of spores in terrigenous Devonian deposits of the Perm Kama region. *Geology and oil and gas content of the north of the Ural-Volga region. Tr. VNIGNI Tr. KF VNIGNI.* Perm, Perm book Publ. house, 1966. Vol. 123, pp. 182–190. (In Russ.)
5. Lyashenko A.I. Stratigraphy of Devonian deposits of the Volga-Ural region. *Geol. oil and gas*, 1960, no. 2, pp. 20–24. (In Russ.)
6. Oil and gas bearing and promising complexes of the central and eastern regions of the Russian Platform. *Devonian deposits of the Volga-Ural oil and gas region. Tr. VNIGNI.* Leningrad, Nedra Publ., 1970. Vol. 2, no. 75, 272 p. (In Russ.)
7. Tikhomirov S.V. *Stages of Devonian sedimentation of the Russian Platform and general issues of the development and structure of the stratosphere.* Moscow, Nedra Publ., 1995. 445 p. (In Russ.)
8. Bagaev A.N. Givet sandstones in the north of the Perm region. *Oil and Gas Geology. Theory and practice*, 2012, vol. 7, no 1. (In Russ.) DOI: https://doi.org/10.17353/2070-5379/1_2015 Available at: http://www.ngtp.ru/rub/4/14_2012.pdf (accessed 15 March 2024).
9. Mikryukov M.F., Timergazin K.R. New data on the stratigraphy and lithology of Devonian terrigenous deposits of the Bavlinsko-Tuymazinsky oil-bearing region. *Neft. household*, 1948, no. 9, pp. 43–53. (In Russ.)
10. *Stratigraphic Dictionary of the USSR. Cambrian, Ordovician, Silurian, Devonian.* Eds. I.E. Zanin, B K. Likharev. Leningrad, Nedra Publ., 1975. 622 p. (In Russ.)

11. Ziegler W., Sandberg C. The Late Devonian Standard Conodont Zonation. *Cour. Forsch.-Inst. Senckenberg*, 1990. 115 p. DOI: <https://doi.org/10.1130/MEM127-p227>.
12. Ziegler W. *Taxonomy and phylogeny of Upper Devonian conodonts and their stratigraphic significance* Abh. Hess. L.-Amt Bodenf., 1962. 166 p. (In Germ.)
13. Ziegler W. Conodont stratigraphy of the European Devonian. *Geol. Soc. Amer. Mem*, 1971, vol. 127, pp. 227–284. DOI: <https://doi.org/10.1130/MEM127-p227>.
14. Fortunatova N.K., Shik S.M., Zaytseva E.L. *Unified subregional stratigraphic scheme of Upper Devonian deposits of the Volga-Ural subregion*. Moscow, FGBU «VNIGNI» Publ., 2018. 64 p. (In Russ.)
15. Tsyganko V.S. *Devonian of the western slope of the northern Urals and Pai-Khoi (stratigraphy, principles of division, correlation)*. Ekaterinburg, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences Publ., 2011. 356 p. (In Russ.)
16. Fortunatova N.K., Zaytseva E.L., Kartseva O.A. The structure of the Devonian terrigenous complex and the position of the boundary of the Middle and Upper Devonian in the west of Tatarstan. *Bulletin of the MOIP. Geological department*, 2013, vol. 88, no. 2, pp. 22–49. (In Russ.)
17. Belousov A.K. Bauxites and diaspore-chamosite ores of the western slope of the Southern Urals. *Proceedings of the All-Union Research Institute of Mineral Raw Materials*, 1937, vol. 112, pp. 70–106. (In Russ.)
18. Araslanova R.M., Stashkova E.K. Zonal division based on spores of Lower Frasnian deposits and identification of the Timan horizon in sections of the Perm Kama region. *Geological study and use of subsoil: scientific-technical informational bulletin LLC Geoinformmark*, 2002, vol. 1, pp. 9–20. (In Russ.)
19. Bagaev A.N. Frasnian sandstones in the north of the Perm region. *Oil and Gas Geology. Theory and practice*, 2015, vol. 10, no. 1. (In Russ.) Available at: http://www.ngtp.ru/rub/4/1_2015.pdf (accessed 15 march 2024).
20. Stashkova E.K., Matyashov S.V., Panyaev A.V., Friks M.G., Titova G.I., Vilesov A.P., Potapov V.P., Akulova N.N., Bykova N.V., Batova I.S., Araslanova R.M., Stukova T.V. Geological results of drilling Shirokovskaya parametric well 1 (Perm region). *Geology, methods of search, exploration and assessment of deposits of fuel and energy raw materials*. Moscow, Geoinformmark Publ., 2004. 78 p. (In Russ.)
21. *Methodological recommendations for correlation of well sections*. Ed. by I.S. Gutman. Moscow, Nedra Publ., 2013. 112 p. (In Russ.)
22. *X-ray diffraction of the main types of rock-forming minerals (layered and framework silicates)*. Ed. by V.A. Frank-Kamenetsky. Leningrad, Nedra Publ., 1983. 359 p. (In Russ.)
23. *The Rietveld Method. International Union of Crystallography*. Ed. by R.A. Young. UK, Oxford University Press, 1993. 298 p. DOI: <https://doi.org/10.1002/crat.2170300412>.
24. Thomsen V. Basic fundamental parameters in X-ray fluorescence May Spectroscopy. *Springfield then Eugene then Duluth*, 2007, vol. 22, no. 5, pp. 46–50.
25. Logvinenko N.V. *Petrography of sedimentary rocks (with the basics of research methods)*. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1974. 400 p. (In Russ.)
26. Cox R., Lowe D.R.A. Conceptual review of regional-scale controls on the composition of clastic sediment and the co-evolution of continental blocks and their sedimentary cover. *Journal of Sedimentary Research*, 1995, vol. 1, pp. 1–12.
27. Pettijohn F.I., Potter P.E., Siever R. *Sand and sandstone*. New York, Springer, 1972. 618 p.
28. Boynton W.V. Geochemistry of the rare earth elements: meteorite studies. Ed. by P. Henderson. *Rare earth element geochemistr.* Elsevier, 1984, pp. 63–114. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-444-42148-7.50008-3>.
29. Bhatia M.R. Plate tectonics and geochemical composition of sandstones. *J. Geol.*, 1983, vol. 91, pp. 611–627. DOI: <http://dx.doi.org/10.1086/628815>.
30. Cullers R.L. Implications of elemental concentrations for provenance, redox conditions, and metamorphic studies of shales and limestones near Pueblo, CO, USA. *Chem Geol.*, 2002, vol. 191, pp. 305–327. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(02\)00133-X](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(02)00133-X).
31. Kutukov A.V., Chernyshev I.V. On the Givetian-Lower Frasnian deposits of the platform part of the Perm region. *Geological structure and oil and gas potential of the Volga-Ural region and adjacent areas: Tr. VNIGNI*, 1963, vol. 36, pp. 121–126. (In Russ.)
32. *400 million years of geological history of southern Eastern Europe*. Eds. N.V. Mezhelovsky, N.V. Morozov, A.M. Nikishin. Moscow, Geokart, GEOS Publ., 2005. 388 p. (In Russ.)
33. Selim S.S. Sedimentology and stratigraphic evolution of fluvial-tidal transition reservoirs: an outcrop analog for the hydrocarbon-bearing Bahariya Formation, Western Desert, Egypt. *Journal of Sedimentary Research*, 2023, vol. 93, no. 1, pp. 50–70.
34. Gama R.M.A., Costa K.B., Dos Reis D.E.S., Pereira E. Paleoenvironmental evolution of an Early Devonian section from Paraná Basin (South of Brazil) based on a multiproxy approach. *J. Sediment. Environ.*, 2022, vol. 7, pp. 111–123.
35. Bonev N., Chiaradia M., Moritz R. Strontium isotopes reveal Early Devonian to Middle Triassic carbonate sedimentation in the Sakar-Strandzha Zone, SE Bulgaria. *Int J Earth Sci (Geol Rundsch)*, 2022, vol. 111, pp. 1307–1314.
36. Xia J., Zhong Z., Huang S., Luo C., Lou H., Chang H., Li X., Wei L. The proto-type basin and tectono-paleogeographic evolution of the Tarim basin in the Late Paleozoic. *Front. Earth Sci*, 2023, vol. 11, pp. 1–17.
37. Chen Wu, Jie Li, Zuza A.V., Haproff P.J., Xuanhua Chen, Lin Ding. Proterozoic–Phanerozoic tectonic evolution of the Qilian Shan and Eastern Kunlun Range, northern Tibet. *GSA Bulletin*, 2021, vol. 134, no. 9–10, pp. 2179–2205.
38. Waters J., Ausich W. *Gennaeocrinus tariatensis*, a new Emsian (Devonian) monobathrid crinoid from the Tarvagatay Terrane of Mongolia. *Journal of Paleontology*, 2022, vol. 96, no. 3, pp. 631–637.
39. Sulima A.I., Plyusnin A.V., Pleshkov L.D., Trubin Ya.S., Timofeev V.D. Structure and stages of development of the sedimentary basin of the northeast of the East European Platform in the Proterozoic and Paleozoic based on long-term observations of geological sections and studies of deep wells. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 11, pp. 141–160. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18799/24131830/2021/11/2928>.

40. Plyusnin A.V., Sulima A.I., Staroselets D.A., Tomilina E.M., Isaeva G.A., Afonin I.V., Fedotov I.S., Rabtsevich E.S., Bobrov D.M., Sergeev M.S. Sedimentation conditions, material composition and reconstruction of rocks of the feeding provinces of the Visean stage of the Bashkir arch (based on the results of studying a well core in the south of the Perm region). *Georesursy*, 2024, vol. 26 (1), pp. 52–70. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18599/grs.2024.1.5>

Information about the authors

Igor V. Afonin, Cand. Sc., Senior Researcher, National Research Tomsk State University, 36, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation; heaven05@list.ru; <https://orcid.org/0000-0001-5942-6688>

Alexey V. Plyusnin, Cand. Sc., Scientific Consultant, Almeteyevsk State Technological University "Higher School of Oil", 186A, Sovetskaya street, Almeteyevsk, 423462, Russian Federation; a.v.plyusnin@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2386-0287>

Elena M. Tomilina, Senior Lecturer, Perm State National Research University, 15, Bukirev street, Perm, 614990, Russian Federation; tomilinaelena.psu@yandex.ru

Evgenia S. Rabtsevich, Cand. Sc., Research Engineer, National Research Tomsk State University, 36, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation; evgenia882-a@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-9275-4453>

Ilya S. Ivanov, I Category Engineer, Branch of LUKOIL-Engineering LLC "PermNIPIneft" in Perm, 21A, Academician Korolev street, Perm, 614000, Russian Federation; Ilja.Ivanov@pnn.lukoil.com

Ivan V. Myakshin, I Category Engineer, Branch of LUKOIL-Engineering LLC "PermNIPIneft" in Perm, 21A, Academician Korolev street, Perm, 614000, Russian Federation; Ivan.Myakshin@pnn.lukoil.com

Alexander I. Sulima, Applicant, Perm State National Research University, 15, Bukirev street, Perm, 614990, Russian Federation; super.sulima2013@yandex.ru

Received: 03.04.2024

Revised: 14.07.2024

Accepted: 24.01.2025

УДК 550.83+552.5+553.98

DOI: 10.18799/24131830/2025/2/4890

Шифр специальности ВАК: 1.6.9, 1.6.12

Определение водонасыщенности песчаника в нефтегазонасыщенных низкоомных коллекторах при присутствии поверхностной электропроводимости

И.А. Мельник✉

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск

✉ melnik@tpu.ru

Аннотация. Актуальность. При стандартной интерпретации материалов промысловой геофизики иногда возникают проблемы несоответствия результатов интерпретации результатам испытаний пластов. Продуктивные нефтегазонасыщенные интервалы интерпретируются как водонасыщенные и пропускаются, причем данное явление обусловлено образованием низкоомных коллекторов в результате формирования в породе поверхностной электрической проводимости. При отсутствии каменного материала традиционным методом невозможно определить долю электрической проводимости поверхностного слоя, что приводит к ошибочному вычислению остаточной водонасыщенности. **Целью** настоящей работы является развитие уникального алгоритма вычисления удельного электрического сопротивления смеси поверхностного слоя и воды (по данным геофизических исследований скважин) в проницаемых терригенных породах нефтенасыщенных низкоомных коллекторов, связанных с процессами вторичного геохимического преобразования. **Метод** исследования заключается в разработке математического алгоритма вычисления удельного электрического сопротивления смеси поверхностного слоя и воды на основе формулы Б.Ю. Вендельштейна в рамках модели параллельного соединения и редуцированного уравнения удельным электрическим сопротивлением поверхностного слоя эпигенетически преобразованного песчаника. При постоянных минерализации и температуре интервала в редуцированном уравнении поверхностного слоя переменной величиной является параметр относительной концентрации зарядов. Для вычисления этого параметра предложен метод статистически-корреляционной интерпретации материалов геофизических исследований скважин, позволяющий вычислять содержание калия в песчаной породе. После поточечного определения содержания калия (C_K) по отрицательно-корреляционной степенной зависимости удельного электрического сопротивления (S_K) выявляется уравнение тренда, где определяются три параметра: величина степени и величины максимальной и минимальной концентраций калия. На основании этих трех значений вычисляется параметр относительной концентрации зарядов в поверхностном слое с соответствующим вычислением его удельного электрического сопротивления. Усредненная (по интервалу) величина доли поверхностного слоя в порах определяется по данным каротажных диаграмм. **Результаты.** На основе полученного уравнения удельного электрического сопротивления смеси построены теоретические зависимости, подтверждающие релевантность предложенного алгоритма и валидность результатов его применения. В низкоомных коллекторах четырех пластов различных скважин вычислены удельные электрические сопротивления смеси, приращенные удельные электрические сопротивления и на основе уравнения Дахнова–Арчи определены коэффициенты остаточной водонасыщенности и нефтенасыщенности, соответствующие результатам испытаний пластов. **Выводы.** Сопоставление результатов определения характера насыщения пластов, вычисленного на основе предлагаемого алгоритма, с эмпирическими результатами испытания пластов показали их соответствие между собой с высокой степенью достоверности.

Ключевые слова: низкоомный коллектор, нефтегазонасыщенность, водонасыщенность пласта, поверхностная электропроводимость, удельное сопротивление песчаника, пропущенная залежь

Для цитирования: Мельник И.А. Определение водонасыщенности песчаника в нефтегазонасыщенных низкоомных коллекторах при присутствии поверхностной электропроводимости // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 2. – С. 141–150. DOI: 10.18799/24131830/2025/2/4890

UDC 550.83+552.5+553.98
DOI: 10.18799/24131830/2025/2/4890

Sandstone water saturation in oil and gas saturated low resistivity reservoirs with surface conductivity

I.A. Melnik✉

National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

✉ melnik@tpu.ru

Abstract. Relevance. At standard interpretation of field geophysics materials there are sometimes the problems of inconsistency of interpretation results to the results of reservoir tests. Productive oil and gas saturated intervals are interpreted as water-saturated and skipped, and this phenomenon is caused by formation of low resistivity reservoirs as a result of formation of surface electrical conductivity in the rock. In the absence of rock material, it is impossible to determine the fraction of surface electrical conductivity by the traditional method, which leads to erroneous calculation of residual water saturation. **Aim.** To determine an algorithm for calculating the specific electrical resistivity of the surface layer and water mixture (based on the data of geophysical well surveys) in permeable terrigenous rocks of oil-saturated low resistivity reservoirs associated with secondary geochemical transformation. **Method.** Development of a mathematical algorithm for calculating the specific electrical resistance of the surface layer and water mixture on the basis of the previously proposed formula of B.Yu. Wendelstein within the framework of the parallel connection model and the reduced specific electrical resistivity equation of the surface layer of epigenetically transformed sandstone. At constant salinity and interval temperature in the reduced equation of the surface layer, the parameter of relative charge concentration is a variable value. To calculate this parameter, the author has proposed a method of statistical-correlation interpretation of the materials of geophysical studies of wells. This method allows calculating the potassium content in the sandstone rock. After point-by-point determination of potassium content (C_K), a trend equation is established by negative-correlation power dependence of specific electrical resistivity (C_K), where three parameters are determined: degree value and values of maximum and minimum potassium concentrations. Based on these three values, the parameter of relative concentration of charges in the surface layer is calculated with the corresponding calculation of its specific electrical resistivity. The averaged (over the interval) value of the share of the surface layer in pores is determined from the data of logging diagrams. **Results.** On the basis of the obtained specific electrical resistivity equation of the mixture, theoretical curves were constructed, confirming the relevance of the proposed algorithm and validity of the results of its application. In low resistivity reservoirs of four formations of different wells the specific electrical resistivity of the mixture, incremented specific electrical resistivity were calculated and the residual water saturation and oil saturation coefficients corresponding to the results of reservoir tests were determined on the basis of the Dakhnov–Archaie equation. **Conclusions.** Comparisons of the results of determining the nature of reservoir saturation calculated on the basis of the proposed algorithm with empirical results of reservoir testing shown their full correspondence.

Keywords: low resistivity reservoir, oil and gas bearing capacity, water saturation of the formation, surface electrical conductivity, sandstone resistivity, missing reservoir

For citation: Melnik I.A. Sandstone water saturation in oil and gas saturated low resistivity reservoirs with surface conductivity. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 2, pp. 141–150. DOI: 10.18799/24131830/2025/2/4890

Введение

При низкой минерализации воды поверхностная электрическая проводимость (ПЭП) полимиктовой песчаной породы зачастую оказывает значительное влияние на общую величину удельного электрического сопротивления (УЭС) данной породы [1]. А вследствие того, что при стандартной интерпретации материалов геофизических исследований скважин (ГИС) это явление невозможно вычленить и учесть в качестве дополнительной электропроводимости, при определении характера насыщения пласта пренебрежение влияния компоненты ПЭП может приводить к ошибочным результатам интерпретаций ГИС.

Согласно традиционной парадигме, электропроводимость песчаной породы в основном контролируется сквозным током ионов минерализованной воды, заполняющей открытые пустоты песчаника, но с незначительной долей влияния ПЭП [2, 3]. А так как нефть является изолятором, в отличие от минерализованной воды, пониженное УЭС породы всегда ассоциируется с водонасыщенным коллектором. Ошибочно-априорное, субъективное представление о несущественном влиянии ПЭП и других морфологических факторов в нефтегазонасыщенных пластах может привести к пропуску углеводородных залежей, обусловленных появлением низкоомных коллекторов [4–11].

В некоторых случаях такие петрологические характеристики, как структура пород, их фракционный состав с присутствием пирита, являются причиной образования локальной ПЭП, понижающий УЭС породы юрского пласта [5]. Отличие морфологии микропористо-капиллярной структуры, являющейся единственным каналом фильтрации в породе, может быть причиной понижения УЭС. Это показано в работе [6], где образование проводящих путей с гораздо меньшей извилистостью (относительно породы этого же пласта, но в другом месте) явилось причиной формирования низкоомных коллекторов.

В свою очередь, были проведены исследования значимости влияния различных факторов на УЭС пористой породы изучаемого пласта. Важность факторов влияния распределилась в порядке убывания следующим образом: пористость, содержание глины, температура, солёность воды, железистые минералы, типы глин и смачиваемости [7]. Соответственно, такой фактор, как глинистость, характеризующий параметр ПЭП, несет в себе высокую степень актуальности. В [8] показано, что песчаная порода, определяющаяся высокими содержаниями таких глинистых минералов, как иллит и каолинит, характеризуется пониженным УЭС. На одном из нефтегазовых месторождений государства Судан зафиксировано 37 % нефтяных зон с низким УЭС породы, обусловленных высокой остаточной водонасыщенностью, вызванной значительным содержанием иллита, смектита и сложной структурой пор [9]. В порых песчаных пород дельтовых фаций Северной Йотаны содержится значительное количество мелкодисперсных глинистых минералов, что приводит к высокому содержанию связанной воды с соответствующим повышением величины ПЭП, т. е. к низкоомному коллектору [10]. В статье [11] показано, что основной причиной низкого сопротивления в резервуарах сланцевого газа в районе Фулин (Китай) являются графитизация сланца, развитие пирита и дополнительная электропроводимость глин.

В работе [4] дан обобщающий материал всех возможных объективных причин образования ПЭП. Как правило, они делятся на следующие категории: петрофизические, петрологические и геохимические, обусловленные проявлением одной из двух первопричин – условием седиментации либо тектоническим процессом, предопределяющим возникновение каналов фильтраций глубинных флюидов с последующим вторичным процессом наложенного эпигенеза.

Итак, наиболее часто встречаемой петрологическо-петрофизической причиной образования ПЭП являются формирования двойного электрического слоя (ДЭС) глинистой фракции и электропроводя-

щего слоя минералов, содержащих железо (пириты). В свою очередь, в исследуемых пластах земной коры локальные вторичные геохимические изменения породы происходят под влиянием поступающих глубинных флюидов по вертикальным зонам фильтраций – разломам растяжения [12, 13]. Процессы перекристаллизации, метаморфизма полимиктовой песчаной породы при формировании вторичных минералов (например, пирита, иллита) с образованием свободных катионов, приводят к повышению плотности зарядов в диффузионном слое и слое Штерна ДЭС вторичных глин. Формирование слоя с повышенной электрической проводимостью обусловлено геохимическим процессом наложенного эпигенеза в результате углекислотного либо щелочного метасоматозов [4, 14–16]. В этом случае повышение плотности электрических зарядов (ионов, электронов) в «сети» поверхностного слоя приводит к понижению УЭС породы.

Целью настоящей работы является развитие уникального алгоритма вычисления УЭС смеси поверхностного слоя и воды (по данным геофизических исследований скважин) в проницаемых терригенных породах нефтенасыщенных низкоомных коллекторов, связанных с процессами вторичного геохимического преобразования.

Методы исследования

При определении коэффициента k_b – остаточной водонасыщенности исследуемого интервала песчаного пласта, используют уравнение Дахнова–Арчи [2, 3, 17–19]:

$$k_e = \sqrt[n]{\frac{a\rho_e}{k_{no}^m \rho_n}},$$

где a – коэффициент извилистости песчаника; ρ_b – УЭС воды; k_{no} – коэффициент открытой пористости; n – коэффициент насыщенности, зависящий от смачиваемости и геометрии пор; m – коэффициент цементации, зависящий от уплотнения и извилистости пор; ρ_n – «истинное» УЭС породы пласта.

Кроме модели Дахнова–Арчи в петрофизике используют модель И.К. Овчинникова–А.С. Семенова (О–С), модифицированную А.В. Тимохиным. Для уточнения УЭС в терригенных осадочных породах в представленных уравнениях (О–С) необходимо внести такие входные данные, как: УЭС заполнителей мелких фракций, отношения полуосей эллипсоидов, объем крупной фракции. В другой модели (А.А. Рыжова), основанной на строгих физико-химических формулах двойного электрического слоя, при уточнении УЭС породы в череде входных данных необходимо знать радиусы активных и пассивных капилляров, концентрации электрических зарядов. Все перечисленные характеристики можно установить только в результате изучения керн в лабораторных условиях [17].

В отличие от перечисленных моделей, в уравнение Дахнова–Арчи входные параметры можно определить по материалам ГИС.

Как правило, УЭС минерализованной воды определяют лабораторным способом либо, зная температуру и минерализацию пластовой воды, по известной эмпирической зависимости [16]. В этом случае априори считается, что ПЭП в породе отсутствует, либо её вклад несущественен.

Однако многочисленные исследования показывают, что горизонтальные распределения интенсивности вторичных геохимических преобразований контролируются присутствием вертикальных каналов фильтрации, образуя тем самым локальные латеральные зоны формирования ПЭП [5, 12–14, 16, 18]. Следовательно, УЭС одного и того же пласта в различных скважинах может значительно различаться величиной долевого вклада поверхностной проводимости.

В конце шестидесятых годов прошлого века Б.Ю. Вендельштейном была предложена модель параллельного соединения электропроводимости воды и поверхностного слоя в зависимости от z – долевого содержания ПЭП [19]:

$$\frac{1}{\rho_{см}} = \frac{1-z}{\rho_v} + \frac{z}{\rho_{сл}}, \quad (1)$$

где $\rho_{сл}$ – УЭС ДЭС глинистой фракции, её межслоевой проводимости с возможным присутствием вкраплений пиритов и т. д.; $\rho_{см}$ – УЭС смеси воды и ПЭП при параллельном соединении. В этом случае в уравнение Дахнова–Арчи вместо ρ_v необходимо поставить УЭС смеси, соответственно, появляется необходимость в определении УЭС поверхностного слоя и его долевого содержания. УЭС слоя зависит от типа глины, водонасыщенности и интенсивности вторичного геохимического преобразования породы. Все эти характеристики можно определить на основании лабораторных исследований керна, его шлифов и образцов. При отсутствии каменного материала вычисление УЭС слоя возможно только по материалам ГИС. Естественно, точность его вычисления зависит от множества косвенных факторов, учёт которых не всегда представляется возможным. Но, используя метод статистически-корреляционного анализа материалов ГИС исследуемого интервала, можно вычлнить и учесть совокупность вторичных геохимических факторов, влияющих на формирование ПЭП [12, 18].

В работе [16] показан вывод редуцированного уравнения УЭС поверхностного слоя эпигенетически преобразованного песчаника:

$$\rho_{сл} = 0,254 \sqrt{\frac{M}{T}} \frac{1}{q}, \quad (2)$$

где M – минерализация воды [г/л]; T – температура [°C]; $q = Q/Q_{min}$ – относительная Q -концентрация

либо плотность электрических зарядов [отн. ед.]. При исследовании массивов геофизических и петрофизических данных песчаного интервала в скважинных условиях в уравнениях (1), (2) переменными величинами могут быть только параметры z и q , а минерализация и температура являются постоянными величинами.

Если общую пористость песчаной породы рассматривать как сумму: $k_{по} + z$, где z – доля глинистых и электропроводящих минералов, как вторично преобразованных, с повышенной плотностью зарядов, так и первичных, то плотность зарядов будет зависеть от содержания химических элементов в породе, несущих заряд, и степени электрохимического преобразования аллотигенных минералов с содержанием данных элементов. Обозначим C – концентрацию химических элементов в породе; α – степень преобразования породы (в совокупности процессов: электрохимического, флюидодинамического, геохимического). В этом случае плотность зарядов $Q \sim C^\alpha$.

В каждом интервале последовательных выборочных значений либо в выборке интервалов зависимостей электропроводимости от концентраций элементов существуют граничные величины данных содержаний, оказывающих влияние на изменение величины проводимости. Если содержания элементов больше либо меньше определенных граничных значений, то электропроводимость породы не зависит от влияния данных элементов. Вдоль исследуемой координаты (по глубине исследуемого интервала) соответствующие границы выборочных значений содержаний элементов, влияющих на УЭС, обозначим как C_{min} и C_{max} . Поэтому относительная концентрация зарядов равна:

$$q = \lim_{C \rightarrow \max} \left[\frac{C}{C_{min}} \right]^\alpha = \left[\frac{C_{max}}{C_{min}} \right]^\alpha. \quad (3)$$

При $\alpha=0$ параметр $q=1$, следовательно, при отсутствии преобразования породы, приводящего к повышению плотности зарядов, величина ПЭП в исследуемом интервале постоянная.

Рассмотрим необходимые условия проведения корреляционного анализа по данным каротажа скважин, на основании которых определяются содержания химических элементов в изучаемом интервале. Допустим, на основе показаний (в песчаном интервале) приборов спектрального гамма-каротажа либо нейтронного-гамма каротажа скважин получены массивы данных содержаний таких химических элементов, как калий и железо. В песчано-алевролитистой породе калий и железо являются наиболее распространёнными элементами, участвующими в образовании зарядов. В песчаных породах в основном калий содержится в калиевых полевых шпатах и в гидрослюдах (иллитах). В про-

цессах геохимического преобразования, пелитизации полевого шпата (являющегося диэлектриком) данный минерал трансформируется в иллит либо в группу смектитов с повышенной плотностью катионов калия в проводящих, гидратированных слоях ДЭС. Железо содержится в пирите (обладающем электронной проводимостью) и в слабопроводящих либо непроводящих минералах – глауконите и сидерите. Но в результате процессов наложенного эпигенеза данные минералы могут стать источником высокого содержания ионов железа как в растворе, так и в ДЭС глинистой фракции, сильно повышающих электрическую проводимость породы [14, 15, 20]. В этом случае понижение величины УЭС породы в разрезе скважины исследуемого интервала будет обусловлено степенью интенсивности преобразования.

При постоянной пористости породы, на основании формул (1), (2), приращенное УЭС будет равно:

$$\Delta\rho = \rho_g - \rho_{cm} = \rho_g \left(1 - \frac{B}{B(1-z) + q\rho_g z}\right),$$

где $B = 0,254\sqrt{\frac{M}{T}}$. Во всех точках исследуемого по глубине песчаного интервала минерализация воды и температура среды – величины постоянные. УЭС смеси вычисляется по формуле:

$$\rho_{cm} = \rho_g \frac{B}{B(1-z) + q\rho_g z}. \quad (4)$$

Согласно полученному уравнению (4) видно, что в песчаном интервале переменными величинами могут быть только параметры q и z . Если мы будем изучать выборку с различными интервалами, то остальные параметры данной зависимости также могут оказывать сильное влияние на изменение величины УЭС смеси.

В настоящей работе при исследовании песчаных интервалов применялась технология статистически-корреляционной интерпретации (СКИ) материалов ГИС [12, 18]. Этот метод позволяет определять относительные содержания таких химических элементов, как калий и железо, с точностью от 70 % и выше. А отрицательно-степенные корреляционные тренды между выборками содержаний элементов с кажущимся УЭС породы (с коэффициентом корреляции $R > |-0,6|$) определяют тот песчаный интервал, где происходит влияние ПЭП на УЭС песчаника. Таким образом, исследуя выявленную выборку с целью вычисления относительной концентрации заряда по формуле (3), мы получаем три необходимые нам переменные: C_{min} , C_{max} и $\alpha = \beta R^2$. Причем в уравнении тренда степенной параметр β определяется при условии $R > |-0,6|$, где R^2 является показателем, мерой соответствия данных

выборочных значений степени преобразования породы. Переменную z , усредненную по интервалу, обычно находят по данным гамма-каротажа (ГК) и каротажа собственной поляризации (ПС).

Результаты исследования

Используя модель параллельного электрического соединения ДЭС и сквозного тока в пустотном пространстве песчано-алевритовой породы, на основе полученной зависимости (4), были проведены теоретические исследования влияния изменений величин относительного заряда ПЭП, его долевого содержания в порах и минерализации пластовой воды на определение УЭС породы в исследуемых интервалах (рис. 1).

На рис. 1, А показаны две зависимости: вычисляемого приращенного УЭС и задаваемого переменного долевого содержания ПЭП, где от изменения двух переменных параметров: q – относительной концентрации зарядов и z – доли содержания ПЭП, величина приращенного УЭС нелинейно меняется. Причем параметр z задавался с обратной пропорцией параметру q . Приращенное УЭС вычислялось по представленной выше формуле (при температуре 80 °С, минерализации воды 13 г/л и УЭС воды 0, 17 Ом·м), где с увеличением количества зарядов линейно уменьшается доля ПЭП. Получена возрастающе-убывающая кривая приращенного УЭС, подтверждающая то, что при постоянной минерализации и температуре (т. е. изучается интервал) увеличение концентрации зарядов в ПЭП является доминантой в образовании низкоомных интервалов относительно влияния уменьшения долевого содержания ПЭП.

В свою очередь, при исследовании массива данных различных интервалов с целью определения УЭС смеси необходимо учитывать влияние минерализации (M) воды и температуры (T) пласта на УЭС воды. На рис. 1, В показаны закономерности изменения величин доли приращенного УЭС, УЭС воды и УЭС смеси в зависимости от изменения минерализации воды и относительной концентрации зарядов. Здесь заданная положительно-регрессивная переменная q , входящая в уравнения вычислений УЭС приращенного и смеси, показана в правой части вспомогательной оси. Доля приращенного УЭС вычислялась согласно следующей формуле: $\Delta = (\rho_v - \rho_{cm})/\rho_v$. УЭС воды – по известной эмпирической зависимости [16]:

$$\rho_g = 0,5M^{-0,79} \exp\left(\frac{75}{T}\right), \quad (5)$$

где $T=70$ °С. УЭС смеси определялась по формуле (4) при $z=0,2$. Видно, что с ростом относительной концентрации заряда даже при увеличении минерализации пластовой воды до 50 г/л доля приращенного УЭС превышает 10 %.

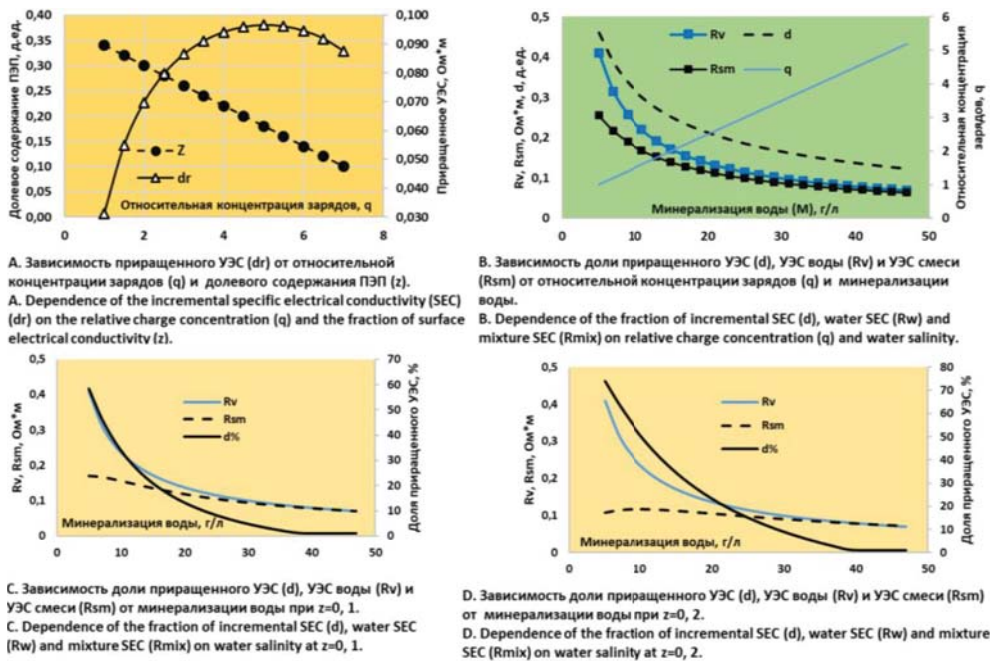


Рис. 1. Результаты теоретических исследований влияния поверхностной электрической проводимости на УЭС песчано-алевритовой породы

Fig. 1. Results of theoretical studies of the effect of surface electrical conductivity on the SEC of sandy silty rock

При постоянной величине относительной концентрации заряда ($q=2,5$) и при $z=0,1$ в районе минерализации 30 г/л доля приращенного УЭС приблизительно равна 5 % (рис. 1, C), но с повышением $z=0,2$, приращенное УЭС $\Delta=10$ % (рис. 1, D). Итак, увеличение доли проводящей компоненты ПЭП приводит к усилению его влияния на понижение УЭС породы даже при минерализации пластовой воды более 30 г/л.

Рассмотрим пример вычисления доли приращенного УЭС (по материалам ГИС) в нефтенасыщенном низкоомном коллекторе. В работе [18] показаны результаты выявления пропущенного продуктивного коллектора (пласт Б9) в скважине 606 на Вахском месторождении. Вычисление содержания калия проводилось по методу СКИ-материалов ГИС. Открытая пористость определялась стандартным способом по ПС.

Рассмотрим корреляционную зависимость кажущегося УЭС, нормированного на коэффициент открытой пористости, от концентрации калия в песчаном интервале (рис. 2). На основании зависимости Дахнова–Арчи устанавливаем следующее: кажущееся УЭС породы изучаемого интервала ($\rho_{\text{каж}}$ – УЭС градиент-зонда ГЗ-3) обратно пропорционально открытой пористости в степени $m \sim 2$, поэтому параметр $J = \rho_{\text{каж}} k_{\text{по}}^2$. В соответствии с полученной зависимостью $J(\rho_{\text{каж}}) = j C_K^{-\beta}$ (рис. 2) степенной параметр $\alpha = 1,47 \times 0,84 = 1,24$ и $C_{\text{min}} = 0,89$; $C_{\text{max}} = 3,75$, где относительная концентрация зарядов равна $q \approx 6$. При усредненной $z=0,18$ (определенной

по ГК и ПС), минерализации воды $M=23,7$ г/л и температуре $T=80$ °С, используя уравнения (1)–(5), была вычислена доля приращенного УЭС (таблица). Следовательно, «действительное» УЭС породы пласта равно $\rho_d = \rho_n(1+\Delta)$. В уравнении Дахнова–Арчи коэффициент $a=0,5$, $k_{\text{по}}=0,17$, $\rho_v=0,270$ Ом·м. Коэффициент нефтегазонасыщенности равен $K_{\text{НГ}}=1-k_v$. При инновационном методе, предложенном автором статьи, в результате интерпретации ГИС вместо ρ_v подставляется УЭС смеси $\rho_{\text{см}}=0,092$ Ом·м.

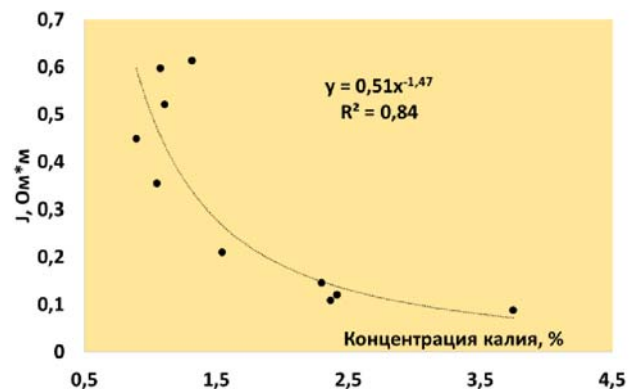


Рис. 2. Зависимость кажущегося УЭС, умноженного на коэффициент открытой пористости, от содержания калия в песчаном интервале 2091,2–2093 м скважины 606 Вахского месторождения

Fig. 2. Dependence of apparent SEC multiplied by open porosity coefficient on potassium content in the sandy interval 2091.2–2093 m of well 606 of the Vakhskoe field

Таблица. Сравнительные результаты традиционного и инновационного методов интерпретации материалов ГИС в низкоомных коллекторах

Table. Comparative results of traditional and innovative methods of interpretation of GIS materials in low resistivity reservoirs

Название скважины Well name	Интервал (пласт) Interval (stratum)	Результаты традиционной интерпретации ГИС Results of traditional interpretation of geophysical well surveys				Результаты СКИ данных ГИС Results of correlation interpretation of geophysical well surveys			
		$\rho_{гр}$, Ом Electrical resistivity of the formation, Ohm	$\rho_{гп}$, Ом Boundary resistivity, Ohm	$K_{иг}$ Oil and gas saturation factor	Насыщение Saturation	Δ , д.ед. Incremental resistance fraction, d.u.e.	$\rho_{а}$, Ом Actual electrical resistance, Ohm	$K_{иг}$ Oil and gas saturation factor	Насыщение по результатам испытаний Saturation based on test results
Вахская, 606 Vakhskaya, 606	2091,2–2093 (Б9)	4,5	6,6	0	Вода Water	0,66	7,50	0,40	Нефть+вода Oil+water
Вынгапуровская, 614 Vyngapurovskaya, 614	1646,8–1651 (ПК22-2)	4,0	4,8	0,25	Неясно Uncertain	0,26	5,04	0,35	Вода+нефть Water+oil
Вынгапуровская, 614 Vyngapurovskaya, 614	1655–1657,8 (ПК22-2)	3,2	3,8	0,32	Неясно Uncertain	0,19	3,81	0,39	
Нижнелугинецкая, 300Р Nizhneluginetskaya, 300R	2407,6–2412 (Ю1-3)	3,6	4,0	–	Вода Water	0,16	4,20	–	

В таблице показаны результаты различных методов интерпретации данных ГИС исследуемых песчаных интервалов, где СКИ-метод можно рассматривать в качестве дополнения к традиционному методу. Согласно полученным результатам, при традиционной интерпретации «истинное» УЭС меньше граничной величины ($\rho_{гр}$), а при инновационной – «действительное» УЭС больше граничной УЭС. Испытания пластов подтвердили наличие нефти в исследуемых интервалах. В качестве примера на рис. 3 представлены результаты спиртбензольной вытяжки образцов породы исследуемого пласта, где присутствие углеводородов в породе определяется по гуммигутовому цвету.



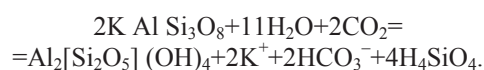
Рис. 3. Спиртбензольная вытяжка образцов породы пласта ПК22-2 (глубина отбора 1647,3–1650,5 м, Вынгапуровская скважина 614). Справа экспонируется бюкс с чистой спиртбензольной смесью

Fig. 3. Alcohol-benzene extract of rock samples from the PK22-2 formation (sampling depth 1647.3–1650.5 m, Vyngapurovskaya well 614). Bunker with pure alcohol-benzene mixture is on the right

Обсуждение результатов

Вторичные геохимические преобразования песчаной породы подразделяются на стадийный и наложенный эпигенез [14]. При стадийном эпигенезе с развитием глинистых минералов открытая пористость и проницаемость породы уменьшаются. Например, в нижнемеловых песчаниках Томской области с высоким содержанием гидробиотитов часто наблюдается формирование по биотиту железистых хлоритов. С образованием по поверхности пор электропроводящей хлоритовой пленки в раствор попадают катионы калия, которые, устремляясь к отрицательно заряженной поверхности глинистой фракции, увеличивают плотность зарядов ДЭС, причем пористость породы уменьшается почти на 2 %, а проницаемость – в 2 раза.

При наложенном эпигенезе, в отличие от стадийного, происходит резкое разделение в пространстве зон с реакциями углекислотного метасоматоза (вторичная каолинитизация с последующей пелитизацией) и щелочного, с отложением карбонатов [14]. Наложный эпигенез обусловлен притоком внешних глубинных флюидов с различной pH относительно заполняемой среды. Например, поступление глубинной воды с растворенным углекислым газом в породу, содержащую калиевый полевой шпат, приводит к следующей реакции [14]:



Здесь мы видим процесс каолинитизации калиевого полевого шпата с генерацией катионов калия. При углекислотном метасоматозе происходит растворение матрицы породы с соответствующим уве-

личением пористости на 2–3 % и проницаемости в несколько раз. Дальнейшее ощелачивание среды, при наличии углеводородов и растворенных в воде органических соединений, приводит к гидрослюдизации каолинита. Получается, что пелитизация калиевого полевого шпата – процесс многоступенчатый. Образующие трёхслойные глинистые минералы (с большей площадью поверхности) с повышенной плотностью зарядов калия в ДЭС контролируют понижение УЭС породы в зависимости от содержания калия. Повышение проницаемости песчаников в процессе вторичной пелитизации подтверждено в работе [21], где показано значительно-аномальное увеличение проницаемости породы с ростом интенсивности процесса пелитизации.

В свою очередь изменение фильтрационно-емкостных свойств (ФЕС) породы вследствие цементации пор может оказывать существенное влияние на проводимость сквозной компоненты электрического тока. Это явление необходимо учитывать при использовании СКИ-данных ГИС. Например, уменьшение пористости в результате увеличения по глубине в порах непроводящего цемента повышает УЭС породы. А если в этой же зоне в заданном направлении происходит уменьшение калийсодержащих минералов, то обратная степенная корреляция УЭС с содержанием калия может быть связана не только с влиянием ПЭП. В этом случае доля влияния ПЭП и сквозного тока может оцениваться при сравнении величин степени уравниваний тренда.

Анализ результатов теоретических исследований при изучении песчаного интервала методом СКИ показывает, что при постоянной пористости наибольшее влияние на УЭС породы оказывает изменение концентрации заряда, накопленного на ПЭП. А степень его влияния, даже при относительно высокой минерализации воды, неоправданно игнорируется. Вторичные геохимические процессы, обусловленные эпигенезом, могут сформировать ПЭП с компонентой повышенной электропроводности. При вычислении водонасыщенности исследуемого интервала в формуле Дахнова–Арчи вместо УЭС воды ставится УЭС смеси, либо ρ_n замещается параметром ρ_d .

Рассмотренный алгоритм действий возможен при появлении ПЭП в результате вторичных эпигенетических процессов. Однако причиной появления низкоомных коллекторов может быть зональное повышение проницаемости породы вследствие увеличения её трещиноватости, что обуславливает относительный рост скорости движения зарядов

сквозного тока. Лито-фракционный состав пород также может явиться причиной понижения УЭС. В этом случае сильное уменьшение размеров гранул песчаника приводит к увеличению площади поверхности ПЭП с соответствующим ростом плотности зарядов [4].

Заключение

Обобщение материалов различных авторов по исследованию низкоомных коллекторов позволило выявить наиболее часто встречающуюся причину образования данного явления – это формирование в пористой среде слоя с повышенной электрической проводимостью. При постоянной минерализации и температуре пласта изменение величины ПЭП обусловлено изменением долевого содержания слоя и плотности (концентрации) в ней зарядов. Как правило, это явление связано со вторичным геохимическим преобразованием аллотигенных минералов в процессах метаморфизма. Образование свободных катионов приводит к формированию поверхностного слоя ПЭП с повышенной плотностью зарядов.

Итак, в рамках модели параллельного соединения сквозного тока и ПЭП теоретические и эмпирические исследования показали релевантность применения полученных зависимостей (1)–(4). С использованием метода СКИ-материалов ГИС при нахождении минерализации и температуры пласта вычисляется относительная концентрация электрических зарядов в поверхностном слое песчаной породы с последующим определением УЭС смеси. При известных УЭС воды и УЭС смеси устанавливаются доля приращенного УЭС, «действительное» УЭС, а на основе уравнения Дахнова–Арчи, при замене УЭС воды на УЭС смеси, определяются коэффициенты остаточной водонасыщенности и нефтегазонасыщенности исследуемого интервала. В этом случае с учетом УЭС слоя удельное сопротивление смеси в низкоомных коллекторах будет всегда меньше сопротивления воды, поэтому коэффициент водонасыщенности будет уменьшаться. Величина доли приращенного УЭС прямо пропорциональна вероятности обнаружения низкоомного коллектора.

Таким образом, сопоставление результатов определения характера насыщения пластов, вычисленных на основе предлагаемого алгоритма при использовании метода СКИ-материалов ГИС, с эмпирическими результатами испытания пластов показало их соответствие между собой с высокой степенью достоверности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Glover P.W.J. Nature of surface electrical conductivity in natural sands, sandstones, and clays // *Geophysical Research Letters*. – March, 1998. – P. 691–694. DOI: 10.1029/98GL00296

2. Kwader T. Estimating aquifer permeability from formation resistivity factors // *Groundwater*. – 1985. – Vol. 23. – № 6. – P. 762–766. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.1985.tb01955.x>
3. Дахнов В.Н. Электрические и магнитные методы исследования скважин. – М.: Недра, 1967. – 390 с.
4. Мельник И.А. Причины образования нефтенасыщенных низкоомных коллекторов // *Геология нефти и газа*. – 2018. – № 6. – С. 129–136.
5. Вахитова Г.Р., Валиуллин Р.А., Кофонова С.Р. Оценка характера насыщенности продуктивных терригенных коллекторов Западно-Сибирского месторождения, характеризующихся низкими значениями сопротивления // *Нефтегазовое дело*. – 2023. – Т. 21. – № 6. – С. 15–26. DOI: <https://doi.org/10.17122/ngdelo-2023-6-15-26>.
6. Saturation evaluation of microporous low resistivity carbonate oil pays in Rub Al Khali Basin in the Middle East / Wang Yongjun, Sun Yuanhui, Yang Siyu, Wu Shuhong, Liu Hui, Tong Min, Lyu Hengyu // *Petroleum Exploration and Development*. – 2022. – Vol. 49. – № 1. – P. 94–106. URL: [https://doi.org/10.1016/S1876-3804\(22\)60007-7](https://doi.org/10.1016/S1876-3804(22)60007-7) (дата обращения 06.09.2024).
7. Studies of electrical properties of low-resistivity sandstones based on digital rock technology / Weichao Yan, Jianmeng Sun, Jinyan Zhang, Weiguo Yuan, Li Zhang, Likai Cui, Huaimin Dong // *Journal of Geophysics and Engineering*. – 2018. – Vol. 15. – Iss. 1. – P. 153–163. URL: <http://dx.doi.org/10.1088/1742-2140/aa8715> (дата обращения 06.09.2024).
8. Integrated analysis of the-low resistivity hydrocarbon reservoir in the «S» field // *Indonesian Petroleum Association*. – May, 2016. URL: <http://dx.doi.org/10.29118/IPA.0.16.436.SE> (дата обращения 09.09.2024).
9. Logging-based assessment of low-resistivity oil zones: a case study from Sudan / Li Chunmeia, Wu Furonga, Zang Dianguanga, Peng Caia, Guo Hongxib, Li Jiea // *Energi Geoscience*. – April, 2021. – Vol. 4. – Iss. 2. URL: <https://doi.org/10.1016/j.engeos.2021.11.005> (дата обращения 09.09.2024).
10. Lowdown of resistivity: effects of microporosity on oil bearing deltafront sandstones, North Jotana, Cambay Basin, India and identification methods / H.S. Bhattacharya, V. Pratap, G.C. Deb, V. Siva, T.K. Das // *5th Conference & Exposition on Petroleum Geophysics*. – Hyderabad, 2004. – P. 115–123. URL: https://spgindia.org/conference/5thconf_hyd04/53046.PDF (дата обращения 09.09.2024).
11. Investigation of the origin of low resistivity and methods for the calculation of gas saturation in shale gas reservoirs in the Fulingarea / Shi Wenrui, Zhang Zhansong, Huang Zisang, Jiang Shu, Shen Jincai, Feng Aiguo, Zhao Hongyan, Xing Jun // *Energy Fuels*. – 2021. – Vol. 35. – № 6. – P. 5181–5193. URL: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.energyfuels.1c00087> (дата обращения 10.10.2024).
12. Мельник И.А., Сидоренко Н.С., Жданова Ю.Ю. Применение метода статистически-корреляционной интерпретации данных ГИС на месторождении Самотлор // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2023. – Т. 334. – № 9. – С. 104–114. DOI: <https://doi.org/10.18799/24131830/2023/9/4000>
13. Предтеченская Е.А., Шиганова О.В., Фомичев А.С. Катагенетические и гидрохимические аномалии в нижнесреднеюрских нефтегазоносных отложениях Западной Сибири как индикаторы флюидодинамических процессов в зонах дизъюнктивных нарушений // *Литосфера*. – 2009. – № 6. – С. 54–65.
14. Лебедев Б.А. Геохимия эпигенетических процессов в осадочных бассейнах. – Л.: Недра, 1992. – 239 с.
15. Зубков М.Ю. Кристаллографическое и литолого-петрографическое обоснование электрических свойств минералов железа, глини и терригенных коллекторов (на примере пластов БВ8 и ЮВ1 Повховского месторождения. Часть 1) // *Горные ведомости*. – 2008. – № 11. – С. 20–32.
16. Мельник И.А. Причины понижения электрического сопротивления в низкоомных коллекторах // *Геофизические исследования*. – 2014. – № 4. – С. 44–53.
17. Электроразведка методом сопротивлений / С.А. Акуленко, С.А. Березина, А.А. Бобачев, Д.К. Большаков, А.А. Горбунов, И.Д. Игнатова, А.В. Любчикова, М.Н. Марченко, И.Н. Модин, Е.В. Перваго, А.А. Рыжов, М.М. Симонс, Т.Ю. Смирнова, В.А. Шевнин, А.Г. Яковлев. – М.: Изд-во МГУ, 1994. – 160 с.
18. Мельник И.А. Определение неявных нефтегазоносных песчаных интервалов методом статистически-корреляционной интерпретации данных ГИС // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2023. – Т. 334. – № 1. – С. 54–63. DOI: <https://doi.org/10.18799/24131830/2023/1/3891>
19. Добрынин В.М., Вендельштейн Б.Ю., Кожевников Д.А. Петрофизика (физика горных пород). – М.: Нефть и газ, 2004. – 368 с.
20. Гипотеза причины образования низкоомного коллектора на Катыльгинском месторождении / С.М. Шевченко, В.Н. Шевченко, О.В. Губарев, А.Л. Бушковский // *Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса*. – 2008. – № 6. – С. 13–15.
21. Жданова Ю.Ю. Влияние вторичных процессов на петрофизические свойства песчаной породы танопчинской свиты Тамбейского месторождения (Ямало-Ненецкий автономный округа // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2024. – Т. 335. – № 8. – С. 137–147. DOI: <https://doi.org/10.18799/24131830/2024/8/4628>

Информация об авторе

Игорь Анатольевич Мельник, доктор геолого-минералогических наук, профессор отделения нефтегазового дела Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. melnik@tpu.ru

Поступила в редакцию: 05.11.2024

Поступила после рецензирования: 24.12.2024

Принята к публикации: 03.02.2025

REFERENCES

1. Glover P.W.J. Nature of surface electrical conductivity in natural sands, sandstones, and clays. *Geophysical Research Letters*, March, 1998, pp. 691–694. DOI: 10.1029/98GL00296
2. Kwader T. Estimating aquifer permeability from formation resistivity factors. *Groundwater*, 1985, vol. 23, no. 6, pp. 762–766. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.1985.tb01955.x>
3. Dahnov V.N. *Electrical and magnetic methods of well testing*. Moscow, Nedra Publ., 1967. 390 p. (In Russ.)
4. Melnik I.A. Causes of formation of oil-saturated low-resistance reservoirs. *Oil and Gas Geology*, 2018, no. 6, pp. 129–136. (In Russ.)
5. Vakhitova G.R., Valiullin R.A., Kofonova S.R. Assessment of the nature of saturation of productive terrigenous reservoirs of the West Siberian field characterized by low resistivity values. *Oil and Gas Business*, 2023, vol. 21, no. 6, pp. 15–26. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.17122/ngdelo-2023-6-15-26>.
6. Wang Yongjun, Sun Yuanhui, Yang Siyu, Wu Shuhong, Liu Hui, Tong Min, Lyu Hengyu. Saturation evaluation of microporous low resistivity carbonate oil pays in Rub Al Khali Basin in the Middle East. *Petroleum Exploration and Development*, 2022, vol. 49, no. 1, pp. 94–106. Available at: [https://doi.org/10.1016/S1876-3804\(22\)60007-7](https://doi.org/10.1016/S1876-3804(22)60007-7) (accessed 6 September 2024).
7. Weichao Yan, Jianmeng Sun, Jinyan Zhang, Weiguo Yuan, Li Zhang, Likai Cui, Huaimin Dong. Studies of electrical properties of low-resistivity sandstones based on digital rock technology. *Journal of Geophysics and Engineering*, 2018, vol. 15, Iss. 1, pp. 153–163. Available at: <http://dx.doi.org/10.1088/1742-2140/aa8715> (accessed 6 September 2024).
8. *Integrated analysis of the low resistivity hydrocarbon reservoir in the «S» field*. Indonesian Petroleum Association. May, 2016. Available at: <http://dx.doi.org/10.29118/IPA.0.16.436.SE> (accessed 9 September 2024).
9. Li Chunmeia, Wu Furonga, Zang Dianguanga, Peng Caia, Guo Hongxib, Li Jiea. Logging-based assessment of low-resistivity oil zones: a case study from Sudan. *Energi Geoscience*, April, 2021, vol. 4, Iss. 2. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.engeos.2021.11.005> (accessed 9 September 2024).
10. Bhattacharya H.S., Pratap V., Deb G.C., Siva V., Das T.K. Lowdown of resistivity: effects of microporosity on oil bearing deltafront sandstones, North Jotana, Cambay Basin, India and identification methods. *5th Conference & Exposition on Petroleum Geophysics*. Hyderabad, 2004. pp. 115–123. Available at: https://spgindia.org/conference/5thconf_hyd04/53046.PDF (accessed 9 September 2024).
11. Shi Wenrui, Zhang Zhansong, Huang Zisang, Jiang Shu, Shen Jincai, Feng Aiguo, Zhao Hongyan, Xing Jun. Investigation of the origin of low resistivity and methods for the calculation of gas saturation in shale gas reservoirs in the Fulingarea. *Energy Fuels*, 2021, vol. 35, no. 6, no. 5181–5193. Available at: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.energyfuels.1c00087> (accessed 10 October 2022).
12. Melnik I.A., Sidorenko N.S., Zhdanova Yu. Application of the method of statistical-correlation interpretation of GWS data in the Samotlor field. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2023, vol. 334, no. 9, pp. 104–114. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.18799/24131830/2023/9/4000>
13. Predtechenskaya E.A., Shiganova O.V., Fomichev A.S. Catagenetic and hydrochemical anomalies in the Lower Middle Jurassic oil-and-gas bearing sediments of Western Siberia as indicators of fluid dynamic processes in the zones of disjunctive disturbances. *Lithosphere*, 2009, no. 6, pp. 54–65. (In Russ.)
14. Lebedev B.A. *Geochemistry of epigenetic processes in sedimentary basins*. Leningrad, Nedra Publ., 1992. 239 p. (In Russ.)
15. Zubkov M.Yu. Crystallographic and lithologic-petrographic substantiation of electrical properties of iron minerals, clays and terrigenous reservoirs (by the example of formations BV8 and YV1 of Povkhovskoye deposit. Part 1). *Gornye vedomosti*, 2008, no. 11, pp. 20–32. (In Russ.)
16. Melnik I. A. Causes of electrical resistance decrease in low resistivity in low resistivity collectors. *Geophysical Research*, 2014, no. 4, pp. 44–53. (In Russ.)
17. Akulenko S.A., Berezina S.A., Bobachev A.A., Bolshakov D.K., Gorbunov A.A., Ignatova I.D., Lyubchikova A.V., Marchenko M.N., Modin I.N., Pervago E.V., Ryzhov A.A., Simons M.M., Smirnova T.Yu., Shevchin V.A., Yakovlev A.G. *Electrical exploration by the resistance method*. Moscow, Moscow State University Publ. House, 1994. 160 p. (In Russ.)
18. Melnik I.A. Determination of implicit oil-and-gas-bearing sand intervals by method of statistical-correlation interpretation of GWS data. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2023, vol. 334, no. 1, pp. 54–63. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.18799/24131830/2023/1/3891>
19. Dobrynin V.M., Wendelstein B.Y., Kozhevnikov D.A. *Petrophysics (rock physics)*. Moscow, Neft i gaz Publ., 2004. 368 p. (In Russ.)
20. Shevchenko S.M., Shevchenko V.N., Gubarev O.V., Bushkovsky A.L. Hypothesis of the reason of low resistivity reservoir formation at Katylginskoe oilfield. *Equipment and technologies for oil and gas complex*, 2008, no. 6, pp. 13–15. (In Russ.)
21. Zhdanova Yu.Yu. Influence of secondary processes on petrophysical properties of sandy rock of Tanopchinsky Formation of Tambeyskoe field (Yamalo-Nenets Autonomous District). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 8, pp. 137–147. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.18799/24131830/2024/8/4628>

Information about the authors

Igor A. Melnik, Dr. Sc., Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. melnik@tpu.ru

Received: 05.11.2024

Revised: 24.12.2024

Accepted: 03.02.2025

УДК 553.982.23

DOI: 10.18799/24131830/2025/2/4921

Шифр специальности ВАК: 1.6.9

Типизация сейсмогеологических комплексов доюрских отложений юго-востока Западной Сибири

А.А. Волкова✉

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск

✉VolkovaAA@hw.tpu.ru

Аннотация. Актуальность. Неоднородность литологического состава (чередование карбонатных, эффузивных, глинисто-кремнистых и других пород), крутые углы падения пластов, соседство древних пород с гораздо более молодыми породами, следы тектонической активности и процессы метаморфизации затрудняют прогноз перспективных с точки зрения наличия углеводородов объектов доюрского комплекса отложений. **Объект.** Сейсмическое волновое поле доюрского комплекса отложений юго-восточной части Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции (Томская и Новосибирская области). **Цель.** Проведение морфологического описания с последующей систематизацией образов сейсмического волнового поля литологически разнородных горных пород доюрского комплекса. **Методы.** Изучение поведения сейсмического волнового поля в различных геологических формациях доюрского комплекса отложений. Сейсмостратиграфический и сейсмоформационный анализ сейсмических временных разрезов. Обобщение и систематизация накопленных данных. Классификация различных типовых объектов доюрского комплекса по волновой картине. **Результаты и выводы.** Проведена типизация основных сейсмогеологических комплексов доюрских отложений юго-востока Западной Сибири (Томская и Новосибирская области). Рассмотренные критерии сейсмогеологической типизации рекомендуются к оценке и районированию сейсмического волнового поля объектов палеозоя по степени их перспективности. Наиболее ярко на сейсмической записи выделяются известняки, перекрытые корой выветривания, а также моноклиналильные и погруженные блоки органогенных известняков и доломитов. Наименее энергетически выражены выступы магматических пород. Выявлен дополнительный сейсмогеологический класс регулярной записи, отличающийся прогибанием центральной части блоков горизонтально-слоистых пород, что может быть характерно для терригенных отложений (вулканогенно-осадочных образований триаса), которые могут являться бесперспективными в отложениях доюрского комплекса на рассматриваемой территории. Предложены подходы для дальнейшего развития исследования.

Ключевые слова: палеозой, доюрский комплекс, сейсмическое волновое поле, амплитудная характеристика, сейсмический временной разрез, карбонатный коллектор, сейсмогеологический комплекс

Для цитирования: Волкова А.А. Типизация сейсмогеологических комплексов доюрских отложений юго-востока Западной Сибири // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 2. – С. 151–158. DOI: 10.18799/24131830/2025/2/4921

UDC 553.982.23

DOI: 10.18799/24131830/2025/2/4921

Pre-Jurassic seismogeological complexes typification in the south-east of Western Siberia

A.A. Volkova✉

National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

✉VolkovaAA@hw.tpu.ru

Abstract. Relevance. The heterogeneity of the lithological composition (alternation of carbonate, effusive, clay-siliceous and other rocks), steep angles of strata incidence, the neighborhood of ancient rocks with much younger rocks, tectonic activity

evidences and metamorphosis processes make it difficult to predict the objects of the Pre-Jurassic depositional complex that are promising from the point of view of the presence of hydrocarbons. **Object.** Seismic wavefield of the Pre-Jurassic complex of deposits in the southeastern part of the West Siberian oil and gas province (Tomsk and Novosibirsk regions). **Aim.** Carrying out a morphological description followed by systematization of images of the seismic wave field of lithologically heterogeneous rocks of the Pre-Jurassic complex. **Methods.** The study of the seismic wave field behavior in various geological formations of the Pre-Jurassic depositional complex. Seismic stratigraphy and seismic formation analysis of time seismic sections. Generalization and systematization of accumulated data. Classification of various typical objects of the Pre-Jurassic complex according to the wave pattern. **Results and conclusions.** The author has typified the main seismogeological complexes of the Pre-Jurassic deposits of the south-east of Western Siberia (Tomsk and Novosibirsk regions). The considered criteria of seismogeological typification are recommended for assessing and zoning the seismic wave field of Paleozoic objects according to their degree of prospects. The limestones overlain by weathering crust, as well as monocline and submerged blocks of organogenic limestones and dolomites stand out most vividly on the seismic record. The protrusions of igneous rocks are least energetically pronounced. An additional seismogeological class of regular recording was identified. It is characterized by the deflection of the central part of blocks of horizontally layered rocks. This may be characteristic of clastic deposits (volcanogenic sedimentary formations of the Triassic), which may be unpromising in the deposits of the Pre-Jurassic complex in the territory under consideration. The author proposed the approaches for further development of the study.

Keywords: Paleozoic, Pre-Jurassic complex, seismic wave field, amplitude characteristic, seismic time section, carbonate reservoir, seismogeological complex

For citation: Volkova A.A. Pre-Jurassic seismogeological complexes typification in the South-east of Western Siberia. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 2, pp. 151–158. DOI: 10.18799/24131830/2025/2/4921

Введение

Палеозойские отложения занимают обширную территорию Западной Сибири и распространяются за её пределы. Доюрский комплекс отложений, он же палеозой, впервые был отмечен как перспективный с точки зрения нефтегазоносности Западной Сибири в 1932 г. И.М. Губкиным. В 1970-х гг. в ходе изучения новых нефтегазовых месторождений в породах мезозоя А.А. Трофимук обозначил палеозойские отложения как «золотую подкладку» осадочного чехла [1, 2].

Несмотря на то, что в доюрском комплексе отложений сконцентрированы внушительные объёмы углеводородного сырья, ресурсы и запасы рассматриваемого комплекса существенно уступают обнаруженным в отложениях осадочного чехла мезозойского возраста. Следует отметить, что первые месторождения углеводородов в породах фундамента были найдены при более глубоком бурении на мезозойских месторождениях. «Случайно» были открыты более 50 месторождений в палеозое Западной Сибири. Сложность обнаружения нефтегазовых месторождений доюрского комплекса отложений связана главным образом с наличием ловушек неантиклинального типа. Распространены тектонически-экранированные, структурно-литологические и стратиграфические ловушки, которые могут находиться в моноклиналиях и погруженных депрессионных зонах. Считается, что залежи углеводородов могли сохраниться в районах, где развиты устойчивые срединные массивы, на которых герцинские процессы тектогенеза отразились наименьшим образом [3, 4]. Месторождения углеводородов были обнаружены как в коре вывет-

ривания глинисто-кремнистых выступов (Герасимовское, Останинское и др.), так и в кавернозно-трещиноватых карбонатах коренного палеозоя (Арчинское, Малоичское и др.) и даже в гранитах и кислых эффузивах (Чебачье и др.).

Доюрский комплекс отложений представлен блоками пород с разным литологическим составом и, соответственно, с различной акустической жёсткостью, что является предпосылкой для выявления сейсмогеологических критериев типовых объектов. Резкие границы блоков пород обусловлены тектоническими процессами и складчатостью. Только перспективные с точки зрения нефтегазоносности породы включают в себя три типа: карбонатные отложения коренного палеозоя (кавернозно-трещиноватые доломитизированные известняки); коры выветривания, развитые по кремнистым известнякам и кремнеаргиллитам; а также магматические породы эффузивного происхождения. Отдельно выделяются бесперспективные отложения, представленные как терригенными породами, в том числе среди них встречаются остаточные бокситы, так и магматическими породами интрузивного типа. Важно подчеркнуть, что отложения подвергались герцинской складчатости и раннетриасовому рифтогенезу, что повлияло на значительную метаморфизацию и негативно отражается на детализации сейсмогеологического прогноза.

Материалы и методы

Идея типизации волновой картины сейсмической записи не нова и берёт своё начало с учений о сейсмостратиграфии. Ещё Ч. Пейтон [5] выделял на 2Д сейсмических временных разрезах типовые ха-

рактеристики поведения волнового поля. В первую очередь выделяется тип границы осадочных комплексов, который отчётливо фиксируется на данных 2Д-сейсморазведки (несогласие/согласие/перерыв). Затем рассматривается морфология отраженных волн внутри осадочных комплексов, как по типу рисунка сейсмической записи (параллельные/субпараллельные/расходящиеся отражения, потеря сейсмической записи) и по второстепенным конфигурациям отражений (ровные/волнистые/бугристые/линзовидные/разрыв/смятие), так и по сейсмофациальным единицам – элементам клиноформ, заполнению осадками, карбонатным постройкам и сейсмофациям континентального склона [5].

Объёмная работа была проделана К. Марфуртом по типизации волновых характеристик на основе данных различных мировых нефтегазоносных провинций [6–9]. Основные усилия были направлены на создание рекомендаций по классификации сейсмических атрибутов для анализа различных сейсмогеологических комплексов. Классификация основана на визуальных признаках и на атрибутивных характеристиках. К визуальным признакам относятся внутренняя конфигурация отражений и наружные формы формаций. Атрибутивные характеристики следующие: текстура и амплитуда отражений, спектральный состав, когерентность, кривизна, углы падения и схождение отражений. В палеозойских отложениях Западной Сибири из рассмотренных К. Марфуртом сейсмогеологических комплексов можно выделить магматические и карбонатные. Но в связи с глубокими процессами метаморфизации доюрского комплекса в поведении сейсмического волнового поля происходят изменения, не учитываемые в классификациях.

А.А. Нежданов [10] выделяет шесть основных типов волновой картины доюрского комплекса западной части Западной Сибири. Важной особенностью рассмотренных в работе отложений является меньшая крутизна углов падения пластов, что вносит свою детализацию в классификационную схему, которая не проявляется в отложениях Чузикско-Чижалпской зоны нефтегазоаккумуляции в силу крутопадающих пластов, где углы падения достигают 80 градусов (Нюрольская впадина).

Типы волнового поля доюрского комплекса Западной Сибири по А.А. Нежданову следующие [10]:

- 1) отсутствие отражений: интрузивные массивы, внедрённые в терригенно-карбонатные и эффузивно-осадочные тела;
- 2) хаотические отражения с различными углами наклона и неупорядоченным положением осей синфазности: сильнодислоцированные метаморфические и изверженные породы;

- 3) бугристые и холмистые формы отражений: среднедислоцированные терригенные и терригенно-карбонатные палеозойские отложения, углы падения 10–20°;
- 4) куполовидное расположение отражений: эффузивно-осадочные и терригенно-карбонатные отложения палеозоя-триаса с куполовидными структурами, углы падения 5–10°;
- 5) наклонные параллельные и параллельно-волнистые отражения: среднедислоцированные терригенно-карбонатные образования палеозоя, углы падения до 30°;
- 6) параллельные и волнистые динамически выраженные отражения с протяжёнными и устойчивыми осями синфазности: слабодислоцированные эффузивно-осадочные, эффузивные и терригенно-карбонатные породы с незначительными углами падения.

Более детальная типизация основных сейсмогеологических комплексов по анализу 2Д сейсмических профилей на обширной территории Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции предлагается в работах В.А. Конторовича и его коллег [11–14]. Коллективом авторов выделяется регулярная, хаотическая и промежуточная картина сейсмического волнового поля. При этом внутри одного типа волновой картины могут наблюдаться различные значения амплитуд. Важно подчеркнуть, что помимо литологического состава, на вид записи и амплитуду также оказывает влияние степень метаморфизации и количество тектонических нарушений.

Детализация типов волнового поля доюрского комплекса Западной Сибири по В.А. Конторовичу и соавторам следующая:

- 1) хаотическая волновая картина:
 - очень слабая энергетика, без устойчивых отражений: магматические породы (эффузивы, граниты);
 - аномально-низкие амплитудно-энергетические характеристики: глинисто-кремнистые эрозионно-тектонические выступы;
 - сложная узловатая волновая картина (+ разломы): сланцы;
- 2) регулярная волновая картина:
 - аномально высокие амплитуды: известняки, перекрытые корой выветривания;
 - квазипараллельные юре относительно высокоамплитудные отражения: раннетриасовые эффузивы;
 - резко пониженные амплитудно-энергетические характеристики: коры выветривания (силикато-содержащие эрозионно-тектонические выступы);
- 3) промежуточная волновая картина:
 - повышенные значения амплитуд: блоки органических известняков и доломитов (погруженные);

- амплитуды между магматическими породами и сланцами: карбонаты;
- фоновые амплитуды или слегка пониженные: выступы доюрского основания без смены литологии (органогенные известняки и доломиты).

В целом выявленные исследователями закономерности типизации волновой картины сейсмических данных продолжают и дополняют друг друга. Ч. Пейтон, работая с низкокачественными старыми 2Д сейсмическими данными выделил обобщённые образы морфологии отражённых волн и некоторые из них связывал с геологическими объектами. К. Марфурт, работая на значительном количестве более современных сейсмических данных, разделил отражения по формам, характерным для типовых обстановок осадконакопления и их составляющих. А.А. Нежданов и В.А. Конторович с соавторами выявили характерные особенности волновой картины для конкретных литотипов доюрского комплекса, при этом в работах В.А. Конторовича производится детализация для более перспективных с точки зрения нефтегазоносности и изученных бурением областей юго-востока Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции.

Результаты исследования и их обсуждение

Типизация морфологии отражённых волн доюрского комплекса Западной Сибири по В.А. Конторовичу обобщена и систематизирована на рис. 1.

Все фрагменты сейсмических временных разрезов на рисунке заимствованы из работ [11–14]. Наблюдается, что для выделения литотипа верхней части палеозойских отложений следует принимать во внимание как тип рисунка сейсмической записи, так и амплитудную характеристику разреза. Неоднозначность выделения литотипов обуславливается тем, что доюрские отложения Западной Сибири были подвергнуты влиянию герцинской складчатости и раннетриасового рифтогенеза, вследствие чего являются в значительной степени метаморфизованными толщами в фундаменте осадочного чехла [1].

К регулярной волновой картине относятся породы, в меньшей степени подверженные метаморфическим изменениям в процессе формирования отложений доюрского комплекса. Известняки, перекрытые отложениями коры выветривания, характеризуются аномально высокими значениями сейсмических амплитуд, что связано с резким акустическим контрастом, главным образом на границе с юрскими отложениями. Раннетриасовым эффузивам свойственна слоистость и высокоамплитудные отражения, параллельные юре. Глинисто-кремнистые коры выветривания обладают резко пониженными значениями амплитуд в связи с тем, что обладают акустическими свойствами, близкими к вышележащим юрским отложениям.

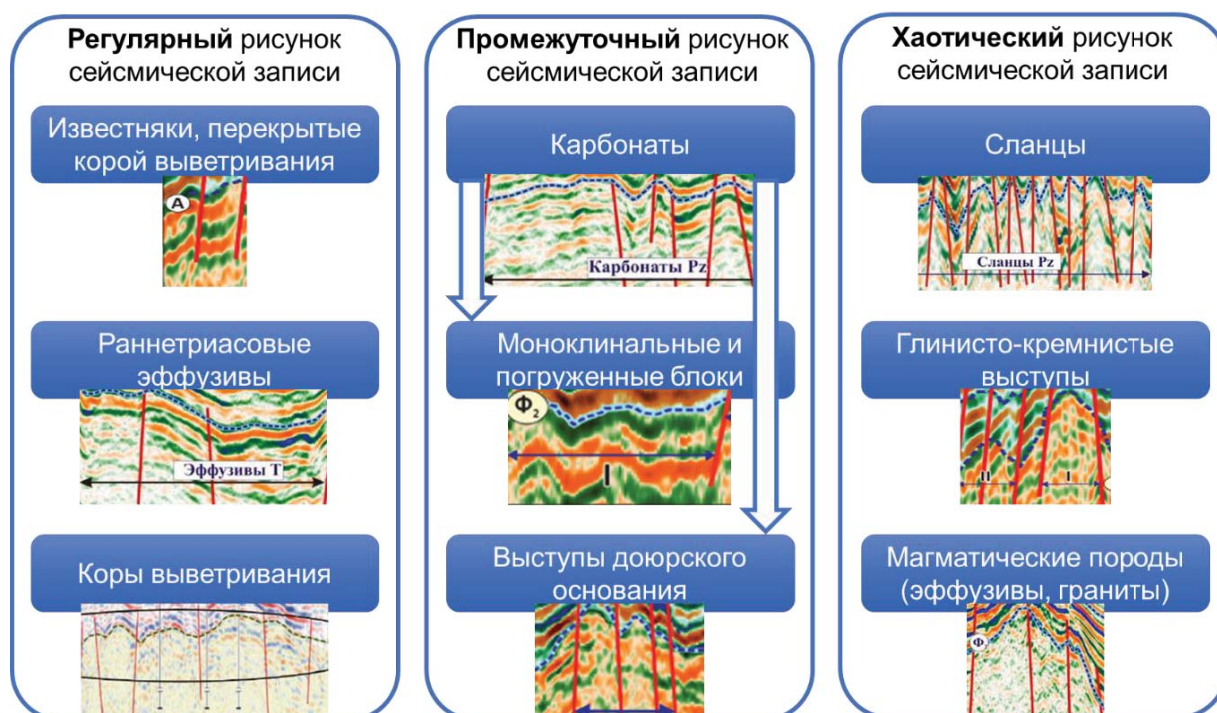


Рис. 1. Типизация основных сейсмогеологических комплексов доюрских отложений юго-востока Западной Сибири на основе работ В.А. Конторовича и его коллег [11–14]

Fig. 1. Typification of the main seismogeological complexes of the Pre-Jurassic deposits of the south-east of Western Siberia based on the work of V.A. Kontorovich and his colleagues [11–14]

В некоторых случаях отнесение сейсмической волновой картины к регулярной или хаотической является спорным вопросом, поэтому было принято решение выделить промежуточную группу, яркими представителями которой служат карбонатные отложения палеозоя. Важно подчеркнуть, что на выступах, представленных доломитами и органическими известняками, сейсмические волны склонны к рассеиванию за счёт шероховатости поверхности и практически полного отсутствия горизонтальных границ для отражения, следствием чего является низкая амплитуда сейсмической записи. Характерно, что для моноклинальных и погруженных карбонатных блоков свойственны повышенные амплитуды.

К хаотическому рисунку сейсмической записи преимущественно относятся эрозионно-тектонические выступы, а также сланцы. Сланцы проявляются в сейсмическом поле сложной узловатой волновой картиной, обычно разрез осложнён большим количеством тектонических нарушений. Глинисто-кремнистые выступы, так же как и коры выветривания, обладают аномально низкими ам-

плитудно-энергетическими характеристиками. У магматических пород палеозоя, представленных преимущественно эффузивами и гранитами, наблюдается очень слабая энергетика волнового поля, без устойчивых отражений.

Рассмотренные критерии сейсмогеологического районирования на типовых объектах палеозоя были применены на группе месторождений, расположенных в районе юго-западной части Усть-Тымского грабен-рифта, которые представляют собой наибольший интерес с точки зрения охвата различными типами горных пород. В качестве рассматриваемого объекта был выбран композитный разрез по трём 2Д сейсмическим профилям, на которых была проведена объектно-ориентированная переобработка сейсмических данных с целью подчёркивания отложений палеозоя и снижения влияния кратных волн от перекрывающих юрских отложений [15]. Следует отметить, что выбранный композитный профиль вскрыт двумя глубокими разведочными скважинами, а вблизи профиля расположены ещё три скважины (рис. 2).

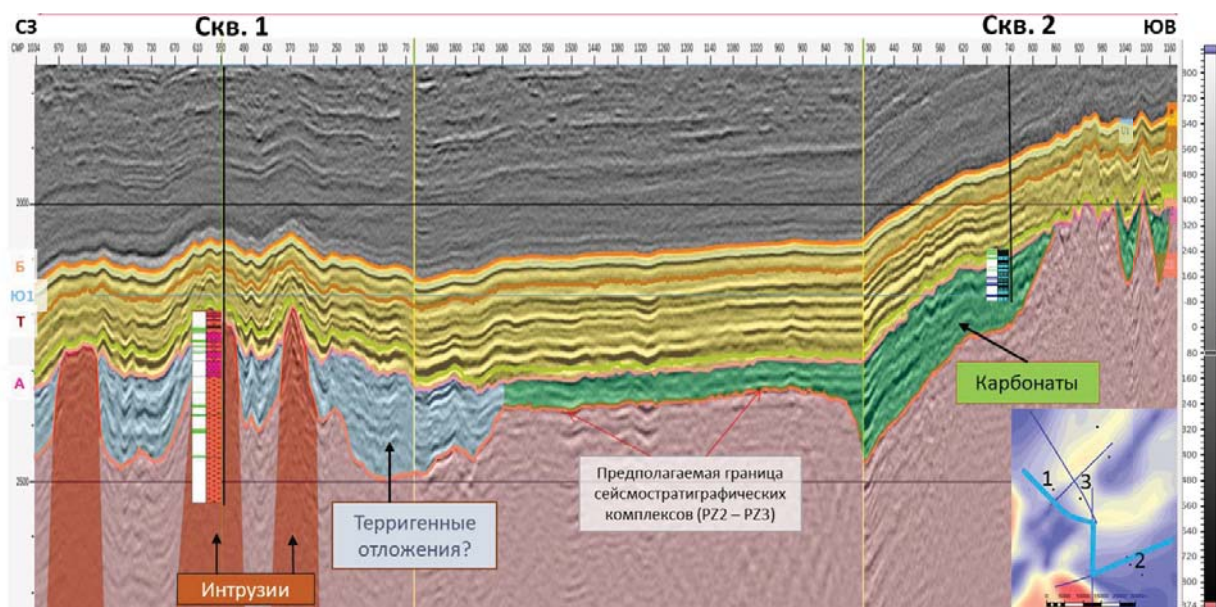


Рис. 2. Композитный временной сейсмический разрез по 2Д-профилям. Цветами на разрезе отмечены сейсмокомплексы и формации: жёлтый – юрские отложения, оранжевый – глубокий палеозой, зелёный – карбонатные формации, коричневый – интрузии, серый – предполагаемые терригенные отложения (новый тип сейсмической волновой картины). Справа показано положение разреза на карте аномального магнитного поля (нТл), где красным цветом обозначены высокие значения, синим – низкие. Цифрами отмечены скважины (реальные названия засекречены), две из которых находятся в непосредственной близости от композитного профиля. Тонкими синими линиями отмечены сейсмические профили, а жирной голубой линией выделен композитный профиль, сейсмический разрез по которому представлен на основной части рисунка [15]

Fig. 2. Composite seismic time section along 2D profiles. Seismic complexes and formations are marked with colors on the section: yellow – Jurassic deposits, orange – deep Paleozoic, green – carbonate formations, brown – intrusions, gray – supposed terrigenous deposits (a new type of seismic wave pattern). The position of the section on the map of the anomalous magnetic field (nT) is shown on the right, where red is high and blue is low. The numbers indicate wells (the real names are classified), two of which are located in the immediate vicinity of the composite profile. The seismic profiles are marked with thin blue lines, and the composite profile is highlighted with a bold blue line, along which the seismic section is shown in the main part of the figure [15]

По характеру сейсмической волновой картины выделяется как хаотическая, так и регулярная волновая картина. В соответствии с сейсмогеологическим районированием В.А. Конторовича, хаотическая запись с наибольшей вероятностью сформирована магматическими породами, а регулярная – моноклинальными и погруженными блоками. В северо-западной части разведочной Скважины 1 было вскрыто интрузивное магматическое тело, а вблизи юго-восточного окончания профиля на геологической карте ЗапСибНИИГГ [16] выявлены выходы среднего палеозоя, также представленного магматическими породами. Скважина 2 вскрыла карбонатные отложения на юго-восточном участке профиля, которые соответствуют регулярной сейсмической записи с повышенной амплитудой. По сейсмогеологическому районированию это блоки моноклинальных и погруженных карбонатных пород.

В области выступов магматических пород наблюдаются зоны регулярной сейсмической записи, отличительной особенностью которой является прогибание, то есть непараллельность с увеличением времени от периферии к центральной части. Отнесение этих областей (выделены на рис. 2 серым цветом) к какому-либо сейсмогеологическому типу остаётся спорным вопросом, так как их поведение отличается от поведения погруженных карбонатных пород пониженными значениями амплитуд, и более выражено прогибание разреза, чем у раннетриасовых эффузивов. Вероятно, что в раннетриасовое время происходило заполнение пониженных зон магматических выступов терригенными отложениями, которым свойственен эффект дифференциального уплотнения. Необходимо подчеркнуть, что эти области характеризуются пониженными значениями гравитационного и магнитного полей, что свойственно для осадочных пород и исключает

заполнение эффузивными породами. Для уточнения рассматриваемого вопроса необходимо привлечение дополнительной скважинной информации.

Заключение

Рассмотренные критерии сейсмогеологической типизации рекомендуются к оценке и районированию сейсмического волнового поля объектов палеозоя по степени перспективности. Наиболее ярко на сейсмической записи выделяются известняки, перекрытые корой выветривания, а также моноклинальные и погруженные блоки органогенных известняков и доломитов. Наименее энергетически выражены выступы магматических пород. На основе проведенного морфологического описания и последующей систематизации выделяемых по литературным источникам образов сейсмической записи литологически разнородных пород фундамента выявлен дополнительный сейсмогеологический класс регулярной записи, отличающийся прогибанием центральной части блоков горизонтально-слоистых пород, что может быть характерно для терригенных отложений (вулканогенно-осадочных образований триаса), которые могут являться перспективными в отложениях доюрского комплекса на рассматриваемой территории.

Возможность развития рассмотренного подхода типизации пород доюрского комплекса по морфологии сейсмического волнового поля заключается в использовании данных современных 3Д сейсмических съёмок, а также в сопоставлении сейсмического разреза с конкретной литологией в пробуренных скважинах. Для уточнения строения слабоизученных территорий рекомендуется проведение сейсмогеологического моделирования на основе возможного литологического состава и сопоставления модельного поля с реальными сейсмическими данными [17–20].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Конторович В.А., Калинина Л.М. Геологическое строение и нефтегазоносность палеозоя Западной Сибири, модели эталонных месторождений // Бурение и нефть. – 2019. – № 11. – С. 18–25.
2. Геология нефти и газа Западной Сибири / А.Э. Конторович, И.И. Нестеров, Ф.К. Салманов, В.С. Сурков, А.А. Трофимук. – М.: Недра, 1975. – 680 с.
3. Сурков В.С., Жеро О.Г. Фундамент и развитие платформенного чехла Западно-Сибирской плиты. – М.: Недра, 1981. – 143 с.
4. Геологические условия нефтегазоносности верхней части палеозойского разреза Западной Сибири / А.Э. Конторович, И.А. Иванов, А.Е. Ковешников, В.И. Краснов, Г.Н. Перозио // Теоретические и региональные проблемы геологии нефти и газа. – Новосибирск: Наука, 1991. – С. 152–171.
5. Payton C.E. Seismic stratigraphy – applications to hydrocarbon exploration. – Tulsa, Oklahoma: American Association of Petroleum Geologists, 1977. – 516 p.
6. Marfurt J. Seismic attributes as the framework for data integration throughout the oilfield life cycle. – Tulsa, OK: Society of Exploration Geophysicists, 2018. – 494 p.
7. Chopra S., Marfurt K.J. Seismic attributes for prospect identification and reservoir characterization. – USA: Society of Exploration Geophysicists, 2007. – 481 p. DOI: 10.1190/1.9781560801900
8. Marfurt K.J. The shape of seismic interpretation // Seismic Imaging of Depositional and Geomorphic Systems / Eds. L.J. Wood, T.T. Simo, N.C. Rosen. – SEPM Society for Sedimentary Geology, 2010. – Vol. 30. – P. 241–294. DOI: 10.5724/gcs.10.30
9. Marfurt K.J. Seismic attributes as the framework for data integration throughout the lifespan of oil field. – Tulsa, OK, Society of Exploration Geophysics Distinguished Instructor Series, 2018. – 508 p.

10. Нежданов А.А. Геологическая интерпретация сейсморазведочных данных. – Тюмень: Тюменский индустриальный университет, 2017. – 171 с.
11. Petroleum prospects of the West Siberian Palaeozoic, geoseismic models of reference fields / V.A. Kontorovich, L.M. Kalinina, A.Yu. Kalinin, M.V. Solovyev // Oil and gas geology = Geologiya nefii i gaza. – 2018. – № 4. – P. 5–15.
12. Сейсмогеологические модели палеозойских комплексов и нефтегазоперспективных объектов юго-востока Западной Сибири (Новосибирская область) / В.А. Конторович, Л.М. Калинина, А.Ю. Калинин, К.И. Канакова, М.В. Соловьев // Технологии сейсморазведки. – 2013. – № 9 (53). – С. 1689–1699.
13. Разномасштабные геологические модели, сейсмогеологические критерии прогноза и нефтегазоносность палеозойских отложений Западной Сибири / В.А. Конторович, Л.М. Калинина, А.Ю. Калинин, М.В. Соловьев, К.И. Канакова // ГеоЕвразия 2018. Современные методы изучения и освоения недр Евразии. – М., 2018. – С. 221–224.
14. Нефтегазоперспективные объекты палеозоя Западной Сибири, сейсмогеологические модели эталонных месторождений / В.А. Конторович, Л.М. Калинина, А.Ю. Калинин, М.В. Соловьев // Геология нефти и газа. – 2018. – № 4. – С. 5–15.
15. Комплексирование гравимангниторазведочных и сейсмических данных с целью уточнения геологического строения отложений доюрского комплекса / А. Волкова, Ф.Ф. Зелезняк, Ф.Р. Грабовская, В.П. Меркулов // Геобайкал 2020: 6-я науч.-практ. конф. – Иркутск, 5–9 октября 2020. – М.: ООО "ЕАГЕ ГЕОМОДЕЛЬ", 2020. – С. 18. DOI: 10.3997/2214-4609.202052035.
16. «ЗапСибНИИГТ»: итоговый геологический отчёт. Создание геолого-геофизических моделей доюрского основания Западной Сибири с целью выявления новых нефтегазоперспективных объектов на основе инновационных технологий обработки и интерпретации геолого-геофизических данных. – 2016.
17. Белозёров В.Б., Волкова А.А. Роль сейсмогеологического моделирования в атрибутивном анализе данных сейсморазведки на примере прогноза толщин пласта ЮЗт месторождения нефти юго-западного Казахстана // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 8. – С. 241–249. DOI: 10.18799/24131830/2024/8/4819.
18. Tomassi A., Milli S., Tentori D. Synthetic seismic forward modeling of a high-frequency depositional sequence: The example of the Tiber depositional sequence (Central Italy) // Marine and Petroleum Geology. – 2024. – Vol. 160. – P. 106624.
19. Willacy C., Dooley T.P. Seismic modeling using pseudo-impedance derived from physical models // The leading edge. – 2024. – Vol. 43 (7). – P. 444–452. DOI: 10.1190/tle43070444.1
20. Seismic forward modeling for investigating and interpreting thin beds in a carbonate reservoir in SW Iran / M.S. Mirkamali, A. Javaherian, H. Hassani, M.R. Saberi // Exploration Geophysics. – 2023. – P. 1–24. DOI: 10.1080/08123985.2023.2212697

Информация об авторах

Александра Александровна Волкова, инженер лаборатории геологии месторождений нефти и газа, старший преподаватель отделения нефтегазового дела, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. VolkovaAA@hw.tpu.ru. <https://orcid.org/0000-0002-6980-8759>

Поступила в редакцию: 06.12.2024

Поступила после рецензирования: 16.01.2025

Принята к публикации: 03.02.2025

REFERENCES

1. Kontorovich V.A., Kalinina L.M. Geological structure and oil and gas potential of the Paleozoic of Western Siberia, models of reference deposits. *Drilling and oil*, 2019, no. 11, pp. 18–25. (In Russ.)
2. *Geology of oil and gas in Western Siberia*. Eds. A.E. Kontorovich, I.I. Nesterov, F.K. Salmanov, A.A. Trofimuk. Moscow, Nedra Publ., 1975. 680 p. (In Russ.)
3. Surkov V.S., Zhero O.G. *Foundation and development of the platform cover of the West Siberian Plate*. Moscow, Nedra Publ., 1981. 143 p. (In Russ.)
4. Kontorovich A.E., Ivanov I.A., Koveshnikov A.E., Krasnov V.I., Perozio G.N. Geological conditions of oil and gas potential in the upper part of the Paleozoic section of Western Siberia. *Theoretical and regional problems of oil and gas geology*. Novosibirsk, Nauka Publ., 1991. pp. 152–171. (In Russ.)
5. Payton C.E. *Seismic stratigraphy – applications to hydrocarbon exploration*. Tulsa, Oklahoma, American Association of Petroleum Geologists, 1977. 516 p.
6. Marfurt J. *Seismic attributes as the framework for data integration throughout the oilfield life cycle*. Tulsa, OK, Society of Exploration Geophysicists, 2018. 494 p.
7. Chopra S., Marfurt K.J. *Seismic attributes for prospect identification and reservoir characterization*. USA, Society of Exploration Geophysicists, 2007. 481 p. DOI: 10.1190/1.9781560801900.
8. Marfurt K.J. The shape of seismic interpretation. *Seismic Imaging of Depositional and Geomorphic Systems*. Eds. L.J. Wood, T.T. Simo, N.C. Rosen. SEPM Society for Sedimentary Geology, 2010. vol. 30, pp. 241–294. DOI: 10.5724/gcs.10.30.
9. Marfurt K.J. *Seismic attributes as the framework for data integration throughout the lifespan of oil field*. Tulsa, OK, Society of Exploration Geophysics Distinguished Instructor Series, 2018. 508 p.
10. Nezhdanov A.A. *Geological interpretation of seismic data*. Tyumen, Tyumen Industrial University Publ., 2017. 171 p. (In Russ.)
11. Kontorovich V.A., Kalinina L.M., Kalinin A.Yu., Solovyev M.V. Petroleum prospects of the West Siberian Palaeozoic, geoseismic models of reference fields. *Oil and gas geology = Geologiya nefii i gaza*, 2018, no. 4, pp. 5–15.

12. Kontorovich V.A., Kalinina L.M., Kalinin A.Yu., Kanakova K.I., Solovev M.V. Seismogeological models of Paleozoic complexes and oil and gas prospective objects in the South-east of Western Siberia (Novosibirsk region). *Seismic exploration technologies*, 2013, no. 9 (53), pp. 1689–1699. (In Russ.)
13. Kontorovich V.A., Kalinina L.M., Kalinin A.Yu., Solovev M.V., Kanakova K.I. Multi-scale geological models, seismogeological prediction criteria, and oil and gas potential of Paleozoic deposits in Western Siberia. *GeoEvrasiya*. Moscow, 2018. pp. 221–224. (In Russ.)
14. Kontorovich V.A., Kalinina L.M., Kalinin A.Yu., Solovev M.V. Oil and gas prospective objects of the Paleozoic of Western Siberia, seismogeological models of reference deposits. *Oil and gas geology*, 2018, no. 4, pp. 5–15. (In Russ.)
15. Volkova A., Zeleznyak F.F., Grabovskaya F.R., Merkulov V.P. Integration of gravity, magnetic and seismic data to clarify the geological structure of the Pre-Jurassic complex deposits. *GeoBaikal 2020, 6th scientific and practical conference*. Irkutsk, 5–9 October 2020. Moscow, EAGE Geomodel Publ., 2020. pp. 18. (In Russ.) DOI: 10.3997/2214-4609.202052035.
16. «ZapSibNIIIGG»: the final geological report. Creation of geological and geophysical models of the pre-Jurassic foundation of Western Siberia in order to identify new oil and gas promising objects based on innovative technologies for processing and interpreting geological and geophysical data. 2016. (In Russ.)
17. Belozyorov V.B., Volkova A. Role of seismogeological modeling in the attribute analysis of seismic data using the example of the forecast of the thickness of the Yu3t formation of the southwestern Kazakhstan oil field. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 8, pp. 241–249. DOI: 10.18799/24131830/2024/8/4819 (In Russ.)
18. Tomassi A., Milli S., Tentori D. Synthetic seismic forward modeling of a high-frequency depositional sequence: the example of the Tiber depositional sequence (Central Italy). *Marine and Petroleum Geology*, 2024, vol. 160, p. 106624
19. Willacy C., Dooley T.P. Seismic modeling using pseudo-impedance derived from physical models. *The leading edge*, 2024, vol. 43, no. 7, pp. 444–452. DOI: 10.1190/tle43070444.1
20. Mirkamali M.S., Javaherian A., Hassani H., Saberi M.R. Seismic forward modeling for investigating and interpreting thin beds in a carbonate reservoir in SW Iran. *Exploration Geophysics*, 2023, pp. 1–24. DOI: 10.1080/08123985.2023.2212697

Information about the authors

Aleksandra A. Volkova, Engineer, Senior Lecturer, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. VolkovaAA@hw.tpu.ru. <https://orcid.org/0000-0002-6980-8759>

Received: 06.12.2024

Revised: 16.01.2025

Accepted: 03.02.2025

УДК 621.310.311

DOI: 10.18799/24131830/2025/2/4730

Шифр специальности ВАК: 05.14.01

Математическая модель снижения потерь активной мощности регулированием реактивной мощности на предприятиях с непрерывным циклом производства

И.У. Рахмонов^{1✉}, Н.Н. Ниёзов¹, К.Б. Ниматов², В.Я. Ушаков³,
Ф.Б. Омонов⁴, К.М. Реймов⁵, А.М. Нажимова⁵

¹ Ташкентский государственный технический университет, Узбекистан, г. Ташкент

² Каршинский инженерно-экономический институт, Узбекистан, г. Карши

³ Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск

⁴ Термезский инженерно-технологический институт, Узбекистан, г. Термез

⁵ Каракалпакский государственный университет, Узбекистан, г. Нукус

✉ ilider1987@yandex.ru

Аннотация. Рассмотрена математическая модель регулирования величины реактивной мощности для снижения потерь активной мощности на предприятиях с непрерывным циклом производства. Приведены основные теоретические положения, математический аппарат и результаты, полученные в ходе исследования. Анализируется влияние оптимизации величины реактивной мощности на общую эффективность электропотребления предприятия, предлагаются практические рекомендации по внедрению разработанной модели в производственные процессы.

Актуальность. Непрерывные производственные процессы особенно чувствительны к стабильности и надежности электроснабжения, а также к качеству поставляемой электроэнергии. Для промышленных предприятий с непрерывным циклом производства характерна высокая энергоемкость процессов, снизить которую можно за счет регулирования величины реактивной мощности, вследствие чего уменьшаются потери активной мощности, повысится общая эффективность использования энергии, снизятся производственные издержки, улучшатся экологические показатели. **Цель.** Разработка и апробация математической модели, предназначенной для снижения потерь активной мощности с помощью регулирования величины реактивной мощности на предприятиях с непрерывным циклом производства. Исследование направлено на выявление оптимальных параметров и условий регулирования величины реактивной мощности, которые обеспечат минимальные потери электроэнергии и максимальную эффективность работы электрооборудования. **Методы.** При разработке математической модели применены классические методы оптимизации Лагранжа. На их основе выполнен анализ текущего состояния управления величиной реактивной мощности, а также разработана математическая модель, учитывающая специфику непрерывного производства. Модель включает в себя уравнения баланса мощностей, ограничения по параметрам оборудования и режимам работы предприятия. Для нахождения оптимальных значений реактивной мощности используются методы оптимизации, такие как линейное и нелинейное программирование. **Результаты.** Разработана математическая модель, учитывающая особенности непрерывных производственных процессов и позволяющая оптимизировать распределение величины реактивной мощности. Экспериментальные исследования показали, что применение разработанной модели приводит к значительному снижению потерь активной мощности, увеличению коэффициента мощности и снижению общих энергетических затрат предприятия. Практическая реализация предложенных методов позволила сократить потери активной мощности примерно на 25 % в зависимости от условий производства.

Ключевые слова: технологический процесс, электропотребление, продукция, оптимизация, минимизация, функциональные ограничения, математическая модель, планирование, реактивная мощность

Для цитирования: Математическая модель снижения потерь активной мощности регулированием реактивной мощности на предприятиях с непрерывным характером производства / И.У. Рахмонов, Н.Н. Ниёзов, К.Б. Ниматов, В.Я. Ушаков, Ф.Б. Омонов, К.М. Реймов, А.М. Нажимова // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 2. – С. 159–171. DOI: 10.18799/24131830/2025/2/4730

UDC 621.310.311

DOI: 10.18799/24131830/2025/2/4730

Mathematical model for reducing active power losses by regulating reactive power at enterprises with continuous production mode

I.U. Rakhmonov^{1✉}, N.N. Niyozov¹, K.B. Nimatov², V.Ya. Ushakov³,
F.B. Omonov⁴, K.M. Reymov⁵, A.M. Najimova⁵

¹ Tashkent State Technical University, Tashkent, Uzbekistan

² Karshi Engineering and Economics Institute, Karshi, Uzbekistan

³ National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

⁴ Termez Institute of Engineering and Technology, Termez, Uzbekistan

⁵ Karakalpak State University, Nukus, Uzbekistan

✉ ilider1987@yandex.ru

Abstract. The article presents a mathematical model for reducing active power losses at enterprises with continuous production mode by regulating the magnitude of reactive power. The main theoretical principles, mathematical framework, and results obtained during the study are provided. The authors have analyzed the impact of optimizing the magnitude of reactive power on the overall efficiency of the enterprise power consumption, and proposed practical recommendations for implementing the developed model into production processes. **Relevance.** Continuous production mode is particularly sensitive to the stability and reliability of power supply, as well as the quality of the supplied electricity. Industrial enterprises with continuous production mode are characterized by high energy consumption, which can be reduced by regulating the magnitude of reactive power. This, in its turn, reduces active power losses, increases overall energy efficiency, lowers production costs, and improves environmental performance. **Aim.** To develop and test a mathematical model aimed at reducing active power losses by regulating the magnitude of reactive power at enterprises with continuous production mode. The research focuses on identifying optimal parameters and conditions for regulating reactive power that will ensure minimal energy losses and maximum efficiency of electrical equipment. **Methods.** The development of the mathematical model employs classical Lagrangian optimization methods. Based on these methods, the authors performed an analysis of the current state of reactive power management, and developed a mathematical model, taking into account the specifics of continuous production. The model includes power balance equations, equipment parameter constraints, and operational modes of the enterprise. Optimization techniques such as linear and nonlinear programming are used to determine the optimal values of reactive power. **Results.** The authors developed the mathematical model that takes into account the features of continuous production processes and allows for the optimization of reactive power distribution. Experimental studies shown that the application of the developed model leads to a significant reduction in active power losses, an increase in the power factor, and a reduction in the enterprise overall energy costs. Practical implementation of the proposed methods resulted in a reduction of active power losses by approximately 25%, depending on the production conditions.

Keywords: technological process, electricity consumption, production, optimization, minimization, functional constraints, mathematical model, planning, reactive power

For citation: Rakhmonov I.U., Niyozov N.N., Nimatov K.B., Ushakov V.Ya., Omonov F.B., Reymov K.M., Najimova A.M. Mathematical model for reducing active power losses by regulating reactive power at enterprises with continuous production mode. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 2, pp. 159–171. DOI: 10.18799/24131830/2025/2/4730

Введение

Снижение потерь активной мощности в электрических сетях является одной из ключевых задач для промышленных предприятий, в особенности с непрерывным циклом производства, таких как металлургические заводы, хлопкоочистительные комплексы и химические предприятия. Эти предприятия потребляют значительные объемы электроэнергии, и даже небольшая доля ее потерь может приводить к значительным финансовым убыт-

кам и снижению эффективности производства. Суточные колебания реактивной мощности создают на таких предприятиях сложности в обеспечении энергетического баланса и увеличивают потери активной мощности, снижая эффективность потребления ими электроэнергии.

Управление реактивной мощностью – один из эффективных способов снижения потерь активной мощности. Как известно, реактивная мощность не выполняет полезной работы, но необходима для

поддержания напряжения в сети и обеспечения нормального функционирования электрооборудования. Однако избыток или недостаток реактивной мощности может приводить к значительным потерям активной мощности из-за повышенного тока в сети.

Управление величиной генерации/потребления реактивной мощности позволяет не только снизить потери активной мощности, но и улучшить качество электроэнергии, снизить нагрузку на оборудование и увеличить срок его службы. В современных условиях, когда энергетическая эффективность и экономия ресурсов становятся все более важными, разработка и внедрение математических моделей для управления величиной реактивной мощности на промышленных предприятиях является актуальной задачей [1–7].

Математический аппарат для создания модели

Потребление электроэнергии на предприятиях состоит из двух основных составляющих: а) постоянная составляющая потребления электроэнергии W_0 , не зависящая от основного технологического процесса и включающая расход электроэнергии на освещение, отопление, вентиляцию; б) расход электроэнергии $W_{\text{тех}}$, зависящий от основного технологического процесса. Очевидно, что общее потребление электроэнергии предприятием равно:

$$W = W_0 + W_{\text{тех}}. \quad (1)$$

Соответственно, расходы на оплату электроэнергии также состоят из двух частей:

$$Z = Z_0 + Z_{\text{тех}}, \quad (2)$$

где Z_0 и $Z_{\text{тех}}$ – соответственно, стоимость электроэнергии, не зависящей от основного технологического процесса, и стоимость электроэнергии, потребляемой для обеспечения основного технологического процесса, р. (или другие денежные единицы).

Очевидно, что Z_0 при расчете затрат можно принять постоянной. Эти затраты не зависят не от объема и качества продукции, а от энергосберегающего или энергорасточительного поведения персонала предприятия. Основные затраты зависят от стоимости энергоресурсов, технологического уровня предприятия и стоимости запускаемого оборудования (устройств) – $Z_{\text{тех}}$. Следовательно, величина $Z_{\text{тех}}$ зависит от производственной культуры на предприятии. Таким образом, целью управления потреблением электроэнергии на предприятиях является минимизация потребления как в основном технологическом процессе, так и для обеспечения вспомогательных нужд. Снижение удельного электропотребления экономически обоснованными методами приводит к снижению себестоимости продукции [8–10].

Основной целью исследования является повышение энергоэффективности предприятий на основе минимизации потерь активной мощности за счёт компенсации реактивной мощности. Исходя из этого, математическое моделирование ориентируется на выравнивание соотношения между производимой и потребляемой реактивной мощностью. Выполнение условия $Q_{\text{сеть}} = Q_{\text{КБ}} + Q_{\text{пот}} + \Delta Q$ обеспечивает удовлетворительную величину напряжения на шинах потребителей. Для проверки выполнения этого условия проанализирован суточный график электрической нагрузки объекта исследования. Результаты анализа показали переменный характер потребления реактивной мощности. Это обусловлено сложностью обеспечения баланса реактивной мощности на объектах с нерегулируемыми конденсаторными батареями (КБ), так как из-за избыточного производства реактивной мощности увеличиваются потери активной мощности [11–15].

Потери активной мощности (ΔP) в электрической сети предприятия напрямую связаны с уровнем реактивной мощности (Q) через ток, протекающий по линии. Это объясняется тем, что реактивная мощность увеличивает полную мощность (S) системы, которая рассчитывается как $S = \sqrt{P^2 + Q^2}$, где P – активная мощность. При возрастании Q возрастает и ток в сети ($I = S/U$, где U – напряжение), что, в свою очередь, увеличивает потери активной мощности, определяемые по формуле $\Delta P = I^2 \cdot R$, где R – активное сопротивление линии. В более развернутом виде эти потери могут быть записаны в виде выражения $\Delta P = \frac{(P^2 + Q^2) \cdot R}{U^2}$. Оно показывает, что потери активной мощности прямо пропорциональны реактивной мощности. Следовательно, увеличение реактивной мощности приводит к росту потерь активной мощности из-за увеличения тока, протекающего через сеть, и повышения нагрузок на линии. Управление реактивной мощностью (например, с помощью КБ) является ключевым фактором для минимизации этих потерь и повышения энергоэффективности системы. Если потери реактивной мощности в основном связаны с реактивным током, то $\Delta P = \frac{Q^2 \cdot R}{U^2}$. В этом случае учитывается только влияние реактивной мощности.

Условие баланса реактивной мощности на предприятии с учетом потерь мощности в цехах можно отобразить уравнением:

$$\sum_{i=1}^n Q_{\text{КБ}} + Q_{\text{пот}} + \Delta Q - Q_p = 0,$$

где $\sum_{i=1}^n Q_{\text{КБ}}$ – суммарная мощность КБ, установленных в цехах, кВар; $Q_{\text{пот}}$ – реактивная мощность, потребляемая цехом, кВар; ΔQ – потери реактивной мощности, кВар; Q_p – расчетное значение реактивной мощности, кВар.

Потери реактивной мощности также связаны с потребляемыми активной и реактивной мощностями и могут быть выражены следующим образом:

$$\Delta Q = \frac{(P^2 + Q^2) \cdot X}{U^2},$$

где X – реактивное сопротивление линии, U – напряжение в сети.

Видно, что увеличение потерь реактивной мощности (ΔQ) приводит к росту потока потребляемой реактивной мощности (Q_p), что, в свою очередь, вызывает увеличение потерь активной мощности в системе электроснабжения предприятия. Это подчеркивает важность эффективного управления реактивной мощностью для минимизации общих энергетических потерь и повышения энергоэффективности предприятия.

При решении задачи оптимизации потребления электроэнергии учитывается только часть затрат, которая непосредственно связана с производственным процессом. Другие затраты (заработная плата, амортизация, затраты на содержание зданий и сооружений) либо не учитываются, либо учитываются в виде фиксированной величины [16–19].

Первая часть затрат включает не только оплату за полезно потребленную электроэнергию, но и за потери электроэнергии в технологических линиях электропередачи предприятия. Эти затраты определяются для любого периода T следующим образом:

$$Z = \sum_{i=1}^n N \Delta W_i,$$

где N – цена 1 кВт·ч электроэнергии по тарифу; ΔW_i – потери электрической энергии в i -м цехе, кВт·ч.

Потери активной мощности каждого цеха ΔP_i рассчитываются по формуле:

$$\Delta W_i^t = \int_0^T \Delta P_i dt.$$

Величина ΔP_i учитывает все режимы работы предприятия в рассматриваемый период.

Методы оптимального распределения реактивной мощности в цехах предприятий. При установке на предприятии источников реактивной мощности (ИРМ) необходимо тщательно подбирать оптимальные режимы их работы. При этом выбирается режим с наименьшими потерями активной мощности, что обеспечивает баланс реактивной мощности. Оптимальный режим ИРМ определяется в основном двумя методами: безусловной и условной минимизации. Первый метод на практике используется редко, но он составляет основу метода условной минимизации. Условную минимизацию

применяют при наличии условных экстремумов целевой функции, то есть при наличии ограничений и граничных условий. Использование этих методов привело к разработке дополнительных методов, таких как градиентный, графоаналитический, метод неопределенных множителей Лагранжа и других [20–23].

Принцип равенства относительного прироста потерь активной мощности. Суммарные потери активной мощности на предприятии (ΔP) определяются из выражения:

$$\Delta P = \Delta P_1 + \Delta P_2 + \dots + \Delta P_i. \quad (3)$$

Здесь ΔP – общие потери активной мощности на предприятии, ΔP_i – потери активной мощности в i -м цехе предприятия. Все составляющие в (3) оцениваются в кВт. Для обеспечения баланса реактивной мощности в процессе оптимизации условно предполагается использование одной из установленных на предприятии КБ в качестве балансирующей. Обычно для этой цели выбирается КБ с наибольшей емкостью, поскольку она способна генерировать достаточный объем реактивной мощности для компенсации небаланса в сети. Генерируемая этой балансирующей КБ реактивная мощность обозначается как Q_b и рассматривается как ключевой параметр при расчете распределения реактивной мощности между другими элементами энергосистемы. Такой подход позволяет минимизировать потери активной мощности и обеспечить более стабильный режим работы электрической сети предприятия.

Следовательно, выражение для баланса реактивной мощности можно записать в виде:

$$\sum_{i=1}^{n-1} Q_{KB} + Q_{пот} + \Delta Q - Q_p \pm Q_b = 0, \quad (4)$$

где Q_b – балансирующая реактивная мощность, кВар, которую можно определить из выражения (5):

$$\pm Q_b = Q_p - (\sum_{i=1}^{n-1} Q_{KB} + Q_{пот} + \Delta Q). \quad (5)$$

где, знак « $\pm$ » интерпретируется следующим образом: если в цехе наблюдается недостаток реактивной мощности, используется знак « $-$ »; в нормальном режиме применяется знак « $+$ ».

Подход, отраженный формулой (3), можно применить для определения оптимального распределения реактивной мощности между цехами внутри предприятия, исходя из условия минимума потерь активной мощности. Для нахождения экстремума функции (3) необходимо приравнять нулю частные производные реактивной мощности от общих потерь активной мощности через независимые переменные n :

$$\frac{\partial \Delta P_i}{\partial Q_i} = 0, i = 1, \dots, n.$$

Дифференцируя (6) с учетом (8), получим:

$$\frac{\partial \Delta P_i}{\partial Q_i} + \left(\frac{\partial \Delta P_b}{\partial Q_b} \right) \left(\frac{\partial Q_b}{\partial Q_i} \right) = 0.$$

Поскольку реактивная мощность балансирующего ИРМ является функцией, зависящей от переменной Q_b , то ее можно выразить как:

$$\Delta p_i = \frac{\partial \Delta P_i}{\partial Q_i}.$$

В соответствии с методом Лагранжа, оптимальное распределение достигается при условии равенства относительного прироста потерь активной мощности [6]:

$$\Delta p_i = \frac{\partial \Delta P_1}{\partial Q_1} + \frac{\partial \Delta P_2}{\partial Q_2} = \dots = \frac{\partial \Delta P_i}{\partial Q_i}.$$

После дифференцирования уравнения (8) путем подстановки значения производной $\frac{\partial Q_b}{\partial Q_i} = -1$ получаем:

$$\Delta p_i + \Delta p_b \left(\frac{\partial Q_b}{\partial Q_i} \right) = 0, i = 1, 2, \dots, n.$$

Для обеспечения оптимальности режимов работы на предприятиях должно выполняться равенство относительных приростов потерь активной мощности:

$$\Delta p_1 = \Delta p_2 = \dots = \Delta p_n = \Delta p_b. \quad (6)$$

Из (6) следует, что критерием оптимальности является равенство относительных приростов потерь активной мощности.

Метод неопределенных множителей Лагранжа для расчета потерь активной мощности. Эффективность метода Лагранжа при оптимизации давно подтверждена в многочисленных исследованиях, особенно в решении сложных задач нелинейного математического программирования. Метод Лагранжа для оптимального выбора и распределения устройств компенсации реактивной мощности в электрических сетях промышленных предприятий обладает несколькими ключевыми преимуществами:

1. Учет ограничений – метод позволяет учитывать технические и экономические ограничения системы, что обеспечивает оптимизацию работы сетей без превышения предельных значений.
2. Гибкость – может быть адаптирован к различным условиям при решении задачи минимизации потерь и стоимости компенсации.
3. Минимизация затрат – оптимизирует количество и расположение устройств компенсации, снижая эксплуатационные расходы и потери энергии.
4. Динамическая адаптация – учитывает изменения в сети, что важно для промышленных процессов с переменной нагрузкой.

5. Взаимодействие устройств компенсации – позволяет учитывать взаимодействие различных устройств, что делает решение более точным и эффективным.

6. Повышение надежности – помогает повысить стабильность работы сети и снизить риски перегрузок.

Применение данного метода в рассматриваемой задаче обосновано тем, что он обеспечивает точное соблюдение условий баланса реактивной мощности и минимизацию потерь активной мощности в системе электроснабжения. Таким образом, метод Лагранжа обеспечивает эффективное и экономичное управление компенсацией реактивной мощности, повышая надежность и снижая затраты на энергоснабжение предприятий [24, 25].

Предположим, что существует целевая функция $F(X_1, X_2, \dots, X_n)$, экстремум которой определен в виде:

$$\left. \begin{aligned} W_1(X_1, X_2, \dots, X_n) &= 0 \\ W_2(X_1, X_2, \dots, X_n) &= 0 \\ \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \end{aligned} \right\}. \quad (7)$$

Вместо экстремума функции $F(X_1, \dots, X_n)$ определяется условие экстремума специально построенной функции Лагранжа, включая целевую функцию и уравнения связи. Функция Лагранжа приобретает следующий вид:

$$\Phi = F + \sum_{i=1}^{i=k} \lambda_i W_i.$$

Фиксированные множители λ_i называются неопределенными множителями Лагранжа. Экстремум определяется путем дифференцирования функции по независимым переменным ($X_1, \dots, X_n$) и приравнивания ее частных производных нулю. Интерполяционное выражение Лагранжа описывает произвольную кривую как полином n -й степени:

$$\begin{aligned} F(x) &= \frac{(x - x_1)(x - x_2) \dots (x - x_n)}{(x_0 - x_1)(x_0 - x_2) \dots (x_0 - x_n)} \cdot y_0 + \\ &+ \frac{(x - x_0)(x - x_2) \dots (x - x_n)}{(x_1 - x_0)(x_1 - x_2) \dots (x_1 - x_n)} \cdot y_1 + \\ &+ \frac{(x - x_0)(x - x_1)(x - x_3) \dots (x - x_n)}{(x_2 - x_0)(x_2 - x_1)(x_2 - x_3) \dots (x_2 - x_n)} \cdot y_2 + \dots \\ &\dots + \frac{(x - x_0)(x - x_1) \dots (x - x_{n-1})}{(x_n - x_0)(x_n - x_1) \dots (x_n - x_{n-1})} \cdot y_n. \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} F(x) &= a_n \cdot x^n + a_{n-1} \cdot x^{n-1} + \\ &+ a_{n-2} \cdot x^{n-2} + \dots + a_2 \cdot x^2 + a_1 \cdot x^1 + a_0. \end{aligned} \quad (9)$$

С использованием выражений (8) и (9) можно аппроксимировать произвольную кривую, что позволяет моделировать потери активной мощности в различных условиях. Для аппроксимации потерь активной мощности достаточно применять полином 2-й степени (10), поскольку квадратичная

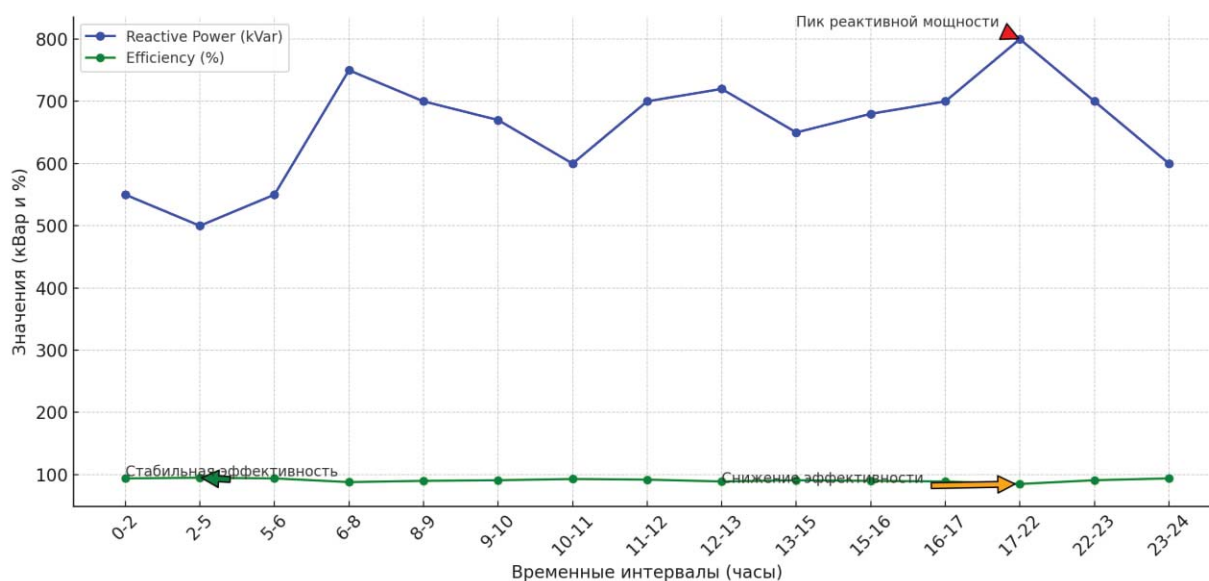


Рисунок. Изменения реактивной мощности (1) и эффективности оборудования (2)
Figure. Changes in reactive power (1) and equipment efficiency (2)

Наоборот, в стабильные периоды, такие как с 2 до 5 часов, уровень реактивной мощности остаётся низким, что позволяет поддерживать высокую эффективность оборудования на уровне 95 %. Это подчёркивает важность управления реактивной мощностью для обеспечения стабильной работы энергосистемы.

Для повышения энергоэффективности рекомендуется оптимизировать работу конденсаторных батарей, особенно в часы пиковых нагрузок, и применять устройства компенсации реактивной мощности. Такой подход позволит снизить потери и обеспечить стабильность работы оборудования на предприятиях с непрерывным производственным циклом.

Практический расчет потерь электроэнергии на хлопкоочистительном предприятии «BCT Cluster Agrokompleks» для их минимизации

Хлопкоочистительное предприятие «BCT Cluster Agrokompleks» потребляет значительные объёмы электроэнергии, обеспечивающей работу технологического оборудования, систем освещения и вентиляции. Помимо активной мощности, им необходима и реактивная мощность, которая используется для создания магнитных полей в электродвигателях, трансформаторах и другом оборудовании.

Потребление реактивной мощности на хлопкоочистительном предприятии «BCT Cluster Agrokompleks» связано с работой мощных электродвигателей в устройствах для очистки, сортировки и упаковки хлопка. Для поддержания стабильности напряжения и предотвращения потерь энергии необходима компенсация реактивной мощности. Вопросы оптимального выбора и распределения устройств компенсации на таком предприятии осо-

бенно актуальны, поскольку неправильная компенсация приводит к снижению эффективности, увеличению затрат и энергетическим потерям. Оптимизация компенсации позволяет повысить коэффициент мощности, улучшить стабильность работы электросети и снизить эксплуатационные расходы.

На предприятии установлены КБ суммарной мощностью 825 кВар. Конденсаторные батареи устанавливаются в соответствии со значениями потребляемой реактивной мощности в номинальных режимах работы цехов предприятия. Также при разных режимах работы, например, минимальной или максимальной нагрузке в конденсаторах, появляются избыточные потери активной мощности.

Таблица 1. Параметры конденсаторных батарей, установленных на предприятии

Table 1. Parameters of capacitor banks installed at the enterprise

Номер группы Group number	Марка Brand	Количество конденсаторных батарей Number of capacitor banks	Напряжение, В Voltage, V	Мощность, кВар Power, kvar
№ 1	УКРМ-0,4-25-5	10	400	250
№ 2	УКРМ-0,4-25-5	14	400	350
№ 3	УКРМ-0,4-25-5	9	400	225

Измерениями и расчетами найдены потери активной мощности, соответствующие значению реактивной мощности, вырабатываемой каждой группой КБ. Измеренные значения приведены в табл. 2.

Таблица 2. Мощности конденсаторных батарей, установленных в цехах предприятия

Table 2. Capacity of capacitor banks installed in workshops of the enterprise

Группа/Group					
1		2		3	
Q, кВАр/kVAr	ΔP, кВт/kW	Q, кВАр/kVAr	ΔP, кВт/kW	Q, кВАр/kVAr	ΔP, кВт/kW
100	5,95	150	8,74	75	5,12
150	9,73	250	16,26	150	10,32
250	20,29	350	25,78	225	18,89

Приведенные в табл. 3 данные получены по графику электрической нагрузки, построенному по суточному потреблению предприятием реактивной мощности. По нему рассчитаны оптимальные значения потребления активной мощности.

Полиномиальное определение зависимости потерь активной мощности от реактивной мощности батареи конденсаторов $\Delta P_i(Q_i)$ с использованием интерполяционного выражения Лагранжа

Потери активной мощности для групп КБ в цехах завода можно рассчитать, используя следующие выражения:

$$\Delta P_I(Q_I) = \frac{(Q^I - 150)(Q^I - 250)}{(100 - 150)(100 - 250)} \cdot 5,95 + \frac{(Q^I - 100)(Q^I - 250)}{(150 - 100)(150 - 250)} \cdot 9,73 + \frac{(Q^I - 100)(Q^I - 150)}{(250 - 100)(250 - 150)} \cdot 20,29 = 0,0002Q^{I^2} + 0,0256Q^I + 1,3875;$$

$$\Delta P_{II}(Q_{II}) = \frac{(Q^{II} - 250)(Q^{II} - 350)}{(150 - 250)(150 - 350)} \cdot 8,74 + \frac{(Q^{II} - 150)(Q^{II} - 350)}{(250 - 150)(250 - 350)} \cdot 16,26 + \frac{(Q^{II} - 150)(Q^{II} - 250)}{(350 - 250)(350 - 150)} \cdot 25,78 = 0,0001Q^{II^2} + 0,0352Q^{II} + 1,205;$$

$$\Delta P_{III}(Q_{III}) = \frac{(Q^{III} - 150)(Q^{III} - 225)}{(75 - 150)(75 - 225)} \cdot 5,12 + \frac{(Q^{III} - 75)(Q^{III} - 225)}{(150 - 75)(150 - 225)} \cdot 10,32 +$$

$$+ \frac{(Q^{III} - 75)(Q^{III} - 150)}{(225 - 75)(225 - 150)} \cdot 18,89 = 0,0003Q^{III^2} + 0,0018Q^{III} + 3,3.$$

В результате получены следующие полиномиальные зависимости потерь активной мощности групп конденсаторных батарей в цехах предприятия:

$$\Delta P_I(Q_I) = 0,0002Q^{I^2} + 0,0256Q^I + 1,3875;$$

$$\Delta P_{II}(Q_{II}) = 0,0001Q^{II^2} + 0,0352Q^{II} + 1,205;$$

$$\Delta P_{III}(Q_{III}) = 0,0003Q^{III^2} + 0,0018Q^{III} + 3,3.$$

Математическая модель скалярной оптимизации

Задачу минимизации потерь активной мощности в электрических сетях предприятия можно решить выявлением оптимального распределения реактивной мощности КБ между цехами предприятия.

Целевая функция в модели оптимизации имеет вид:

$$F = \Delta P_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n (\Delta P_I(Q_I) + \Delta P_{II}(Q_{II}) + \dots + \Delta P_n(Q_n)) \rightarrow \min.$$

Для предприятия «BCT Cluster Agrokompleks»:

$$\Delta P_{\Sigma} = \Delta P_I(Q_I) + \Delta P_{II}(Q_{II}) + \Delta P_{III}(Q_{III}) \rightarrow \min,$$

$$\begin{aligned} \Delta P_{\Sigma} &= 0,0002Q^{I^2} + 0,0256Q^I + 1,3875 + \\ &+ 0,0001Q^{II^2} + 0,0352Q^{II} + 1,205 + \\ &+ 0,0003Q^{III^2} + 0,0018Q^{III} + 3,3 = \\ &= 5,8925 + 0,0002Q^{I^2} + 0,0256Q^I + \\ &+ 0,0001Q^{II^2} + 0,0352Q^{II} + 0,0003Q^{III^2} + \\ &+ 0,0018Q^{III} \rightarrow \min. \end{aligned}$$

Уравнения зависимости потерь активной мощности от реактивной мощности, генерируемой КБ, можно представить как:

$$\Delta P_i(Q_i) = a_{0i} + a_{1i}Q_i + a_{2i}Q_i^2;$$

$$\begin{cases} \Delta P_1(Q_1) = a_{01} + a_{11}Q_1 + a_{21}Q_1^2 \\ \Delta P_2(Q_2) = a_{02} + a_{12}Q_2 + a_{22}Q_2^2 \\ \Delta P_3(Q_3) = a_{03} + a_{13}Q_3 + a_{23}Q_3^2 \end{cases}$$

Таблица 3. Суточное потребление предприятием реактивной мощности по интервалам

Table 3. Daily consumption of reactive power by the enterprise by intervals

Интервал, ч Interval, h	0–2	2–5	5–6	6–8	8–9	9–10	10–11	11–12	12–13	13–15	15–16	16–17	17–22	22–23	23–24
Q _Σ , кВАр/kVAr	550	500	550	750	700	670	600	700	720	650	680	700	800	700	600

$$\begin{cases} \Delta P_I(Q_I) = 1,3875 + 0,0256Q^I + 0,0002Q^{I^2} \\ \Delta P_{II}(Q_{II}) = 1,205 + 0,0352Q^{II} + 0,0001Q^{II^2} \\ \Delta P_{III}(Q_{III}) = 3,3 + 0,0018Q^{III} + 0,0003Q^{III^2} \end{cases}$$

При решении задачи накладываются следующие ограничения:

а) *ограничение в виде неравенства* (автономное ограничение) устанавливает допустимые пределы изменения реактивной мощности КБ:

$$Q_{\min}^i \leq Q^i \leq Q_{\max}^i;$$

$$\begin{cases} Q_{\min}^I \leq Q^I \leq Q_{\max}^I \\ Q_{\min}^{II} \leq Q^{II} \leq Q_{\max}^{II} \\ Q_{\min}^{III} \leq Q^{III} \leq Q_{\max}^{III} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} 100 \leq Q^I \leq 250 \\ 150 \leq Q^{II} \leq 350 \\ 75 \leq Q^{III} \leq 225 \end{cases}$$

б) *ограничение в виде равенства* суммарной реактивной нагрузки предприятия заданной расчетной мощности Q_p :

$$\sum_{i=1}^n Q_{KB} + Q_{пот} + \Delta Q = Q_p.$$

Суточный график электрической нагрузки по реактивной мощности, представленный в табл. 3, показывает, что величина потребления реактивной мощности в течение суток состоит из 15 интервалов. Для оптимального распределения реактивной нагрузки между КБ в каждый интервал суток необходимо, в первую очередь, обеспечить баланс:

$$550 = Q_I^I + Q_{II}^I + Q_{III}^I; 500 = Q_I^{II} + Q_{II}^{II} + Q_{III}^{II};$$

$$550 = Q_I^{III} + Q_{II}^{III} + Q_{III}^{III};$$

$$750 = Q_I^{IV} + Q_{II}^{IV} + Q_{III}^{IV}; 700 = Q_I^V + Q_{II}^V + Q_{III}^V;$$

$$670 = Q_I^{VI} + Q_{II}^{VI} + Q_{III}^{VI};$$

$$600 = Q_I^{VII} + Q_{II}^{VII} + Q_{III}^{VII}; 700 = Q_I^{VIII} + Q_{II}^{VIII} + Q_{III}^{VIII};$$

$$720 = Q_I^{IX} + Q_{II}^{IX} + Q_{III}^{IX};$$

$$650 = Q_I^X + Q_{II}^X + Q_{III}^X; 680 = Q_I^{XI} + Q_{II}^{XI} + Q_{III}^{XI};$$

$$700 = Q_I^{XII} + Q_{II}^{XII} + Q_{III}^{XII};$$

$$800 = Q_I^{XIII} + Q_{II}^{XIII} + Q_{III}^{XIII};$$

$$700 = Q_I^{XIV} + Q_{II}^{XIV} + Q_{III}^{XIV}; 600 = Q_I^{XV} + Q_{II}^{XV} + Q_{III}^{XV}.$$

Оптимальное распределение реактивной нагрузки на конденсаторные батареи

Полиномиальное представление уравнений потерь активной мощности в КБ выглядит так:

$$\Delta P_i(Q_i) = a_{0i} + a_{1i}Q_i + a_{2i}Q_i^2;$$

$$\Delta P_I(Q_I) = 1,3875 + 0,0256Q^I + 0,0002Q^{I^2};$$

$$\Delta P_{II}(Q_{II}) = 1,205 + 0,0352Q^{II} + 0,0001Q^{II^2};$$

$$\Delta P_{III}(Q_{III}) = 3,3 + 0,0018Q^{III} + 0,0003Q^{III^2}.$$

Сравнительные показатели потребления активной мощности определены дифференцированием уравнений, описывающих потребление, соответствующее мощностям КБ. Они представляют собой изменение активной мощности вследствие потерь в цехе, где размещена i -я КБ, при изменении реактивной нагрузки каждого цеха предприятия на величину dQ_i :

$$\Delta p_i(Q_i) = \frac{\partial \Delta P_i(Q_i)}{\partial Q_i} = a_{1i} + 2a_{2i}Q_i$$

$$\begin{aligned} \Delta p_I(Q_I) &= 0,0256 + 2 \cdot 0,0002Q^I \\ &= 0,0256 + 0,0004Q^I; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta p_{II}(Q_{II}) &= 0,0352 + 2 \cdot 0,0001Q^{II} \\ &= 0,0352 + 0,0002Q^{II}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta p_{III}(Q_{III}) &= 0,0018 + 2 \cdot 0,0003Q^{III} \\ &= 0,0018 + 0,0006Q^{III}. \end{aligned}$$

Анализ результатов расчетов (табл. 4, 5) показал, что выбор оптимальной комбинации КБ обеспечивает не только улучшение технико-экономических показателей предприятия, но и снижение активных потерь мощности (рисунок).

При выборе оптимального состава КБ по методу Лагранжа общие потери электроэнергии за счёт оптимальной выработки реактивной мощности в течение суток определяется следующим образом:

$$\Delta W_{\Sigma i} = \sum (\Delta P_i \cdot t_{np}).$$

$$\Delta W_{1\Sigma} = 5,95 \cdot 6 + 9,73 \cdot 2 + 11,99 \cdot 2 + 5,95 \cdot 1 + 11,99 \cdot 1 + 9,73 \cdot 1 + 11,99 \cdot 4 + 20,29 \cdot 5 + 11,99 \cdot 1 + 5,95 \cdot 1 = 274,16 \text{ кВт} \cdot \text{ч};$$

$$\Delta W_{2\Sigma} = 14,19 \cdot 6 + 25,78 \cdot 2 + 20,77 \cdot 4 + 25,78 \cdot 1 + 20,77 \cdot 4 + 25,78 \cdot 5 + 20,77 \cdot 2 = 499,08 \text{ кВт} \cdot \text{ч};$$

$$\Delta W_{3\Sigma} = 15,66 \cdot 6 + 18,89 \cdot 2 + 15,66 \cdot 2 + 12,8 \cdot 1 + 15,66 \cdot 1 + 18,89 \cdot 1 + 15,66 \cdot 4 + 18,89 \cdot 5 + 15,66 \cdot 1 + 12,8 \cdot 1 = 395,96 \text{ кВт} \cdot \text{ч}.$$

После оптимизации режимов работы КБ общие потери электроэнергии в течение суток при компенсации реактивной мощности равны:

$$\Delta W_{\Sigma} = \sum W_{i\Sigma} = 274,16 + 499,08 + 395,96 = 1169,2 \text{ кВт} \cdot \text{ч}.$$

До применения предложенной модели и методов оптимизации потери электроэнергии на предприятии составляли 1560 кВт·ч [6]. При следовании рекомендациям, основанным на расчетах по предложенной модели, удастся снизить потери электроэнергии на 391 кВт·ч.

Таблица 4. Распределение мощностей реактивной нагрузки между КБ на предприятии

Table 4. Distribution of reactive load power between capacitor banks at the enterprise

Расчетное время, кВАр Estimated time, kVAr	Интервал/Interval														
	0–2	2–5	5–6	6–8	8–9	9–10	10–11	11–12	12–13	13–15	15–16	16–17	17–22	22–23	23–24
Q_{Σ}	525	525	525	725	675	675	575	675	725	675	675	675	825	675	575
Q_1	100	100	100	150	175	175	100	175	150	175	175	175	250	175	100
Q_2	225	225	225	350	300	300	300	300	350	300	300	300	350	300	300
Q_3	200	200	200	225	200	200	175	200	225	200	200	200	225	200	175

Таблица 5. Потери активной мощности ΔP_i как функция реактивных нагрузок Q_i для каждого интервала времени по методу Лагранжа

Table 5. Active power losses ΔP_i as a function of reactive loads Q_i for each time interval using the Lagrange method

Расчетное время Estimated time		Интервал/Interval														
		0–2	2–5	5–6	6–8	8–9	9–10	10–11	11–12	12–13	13–15	15–16	16–17	17–22	22–23	23–24
Q_{Σ} , кВАр, kVAr		525	525	525	725	675	675	575	675	725	675	675	675	825	675	575
Группа/Group	1	Q_1 , кВАр, kVAr	100	100	100	150	175	175	100	175	150	175	175	250	175	100
		ΔP_1 , кВт, kW	5,95	5,95	5,95	9,73	11,99	11,99	5,95	11,99	9,73	11,99	11,99	20,29	11,99	5,95
	2	Q_2 , кВАр, kVAr	225	225	225	350	300	300	300	300	350	300	300	350	300	300
		ΔP_2 , кВт, kW	14,19	14,19	14,19	25,78	20,77	20,77	20,77	20,77	25,78	20,77	20,77	25,78	20,77	20,77
	3	Q_3 , кВАр, kVAr	200	200	200	225	200	200	175	200	225	200	200	225	200	175
		ΔP_3 , кВт, kW	15,66	15,66	15,66	18,89	15,66	15,66	12,80	15,66	18,89	15,66	15,66	18,89	15,66	12,80
		ΔP_{Σ} , кВт, kW	35,8	35,8	35,8	54,4	48,42	48,42	39,52	48,42	54,4	48,42	48,42	64,96	48,42	39,52

Закключение

Результаты исследования и их апробации на предприятии «ВСТ Cluster Agrokompleks» можно обобщить в следующем виде:

1. Предложенный авторами метод оптимального выбора и распределения устройств компенсации реактивной мощности учитывает специфику непрерывных производственных процессов, что позволяет адаптировать решения к реальным условиям эксплуатации. Использование метода Лагранжа обеспечивает эффективное решение задач нелинейного программирования с учётом ограничений на параметры оборудования и режимы работы. Экспериментальные данные демонстрируют снижение потерь активной мощности до 25 %, улучшение коэффициента мощности и снижение энергозатрат. Модель проста для интеграции в существующие системы управления энергией, что делает её применимой и экономически выгодной для промышленных предприятий.
2. Разработанная математическая модель позволяет учитывать особенности непрерывных производственных процессов, анализировать суточные графики нагрузки и использовать метод Лагранжа для оптимизации распределения реактивной мощности. Это дает возможность минимизировать потери активной мощности и повысить энергоэффективность системы электрооборудования. Оптимизация величины реактивной мощности позволила уменьшить потери элек-

троэнергии на 391 кВт·ч по сравнению с величиной, достигнутой применяемыми ранее методами управления.

3. Результаты исследования и рекомендации, разработанные на их основе, могут применяться на других предприятиях с непрерывным характером производства. Ссылки на существующие работы, подтверждающие эффективность метода Лагранжа, дополнительно усиливают обоснованность его выбора. Они демонстрируют успешное применение метода в аналогичных задачах, таких как распределение нагрузки в энергосистемах, управление реактивной мощностью и оптимизация энергопотребления. Выбор метода Лагранжа для решения данной задачи является не только оправданным, но и наиболее подходящим с точки зрения точности, надежности и практической применимости [6].
4. Разработанная математическая модель станет основой для дальнейших исследований и практических разработок в области энергетической эффективности потребления электрической энергии промышленными предприятиями. Полученные результаты представляют собой важный шаг в направлении оптимизации объемов их энергопотребления. Практическая применимость и эффективность предложенной модели как важного инструмента для управления энергопотреблением подтверждены экспериментальными данными.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Adhikari R., Agnihotri G. Optimal placement of reactive power compensators to reduce losses using genetic algorithm // *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. – 2013. – Vol. 44 (1). – P. 929–936. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2012.08.001>
2. Azevedo G.M., Correia P.F. Optimal reactive power control in distribution networks using genetic algorithms // *Electric Power Systems Research*. – 2016. – Vol. 137. – P. 29–37. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2016.03.023>
3. Прогнозирование электропотребления с помощью нейронных сетей с LSTM / И.У. Рахмонов, В.Я. Ушаков, Н.Н. Ниёзов, Н.Н. Курбонов // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2023. – Т. 334. – № 12. – С. 125–133. DOI: [10.18799/24131830/2023/12/4407](https://doi.org/10.18799/24131830/2023/12/4407)
4. A multi-objective optimization approach to improve reactive power dispatch considering voltage stability / A. Ebrahimi, S. Ghavidel, L. Li, J. Zhang // *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. – 2018. – Vol. 99. – P. 280–293. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2018.02.022>
5. Kirschbaum C., Verstege J. Reactive power control for loss minimization in smart grids with high penetration of renewable energy sources // *In Innovative Smart Grid Technologies (ISGT)*. IEEE PES. – 2012. – P. 1–8. DOI: <https://doi.org/10.1109/ISGT.2012.6175715>
6. Математическое моделирование минимизации расходов электроэнергии промышленными предприятиями с непрерывным характером производства / И.У. Рахмонов, В.Я. Ушаков, А.М. Нажимова, К.К. Обидов, С.Р. Сулейманов // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2024. – Т. 335. – № 4. – С. 43–51. DOI: [10.18799/24131830/2024/4/4423](https://doi.org/10.18799/24131830/2024/4/4423)
7. Li G., Zhang H., Bo R. A novel method to reduce power loss using distributed reactive power control // *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. – 2014. – Vol. 61. – P. 188–193. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2014.03.021>
8. Liao H., Chuang C.S., Lu L. Hybrid ant colony optimization with particle swarm optimization for power losses minimization considering voltage stability in power system // *Journal of Electrical Engineering & Technology*. – 2012. – Vol. 7 (2). – P. 246–254. DOI: <https://doi.org/10.5370/JEET.2012.7.2.246>
9. Rakhmonov I.U., Reymov K.M. Regularities of change of energy indicators of the basic technological equipment of the cotton cleaning industry // *Journal of Physics: Conference Series*. APITECH-2019. – 2019. DOI: [10.1088/1742-6596/1399/5/055038](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1399/5/055038)
10. Naderi E., Abdollahzadeh H., Narimani H. A new modified teaching-learning algorithm for optimal reactive power dispatch problem with discrete control variables // *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. – 2013. – Vol. 26 (10). – P. 2282–2292. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2013.05.012>
11. Shahgholian G., Moghaddam M.P. Optimal reactive power dispatch for improving voltage profile and reducing power loss using a novel teaching-learning-based optimization algorithm // *Applied Soft Computing*. – 2018. – Vol. 64. – P. 52–67. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2017.11.012>
12. Analysis and calculation of optimum parameters of electric arc furnace / I.U. Rakhmonov, K.M. Reymov, A.M. Najimova, V.Ya. Ushakov, B.T. Seytmuratov // *Journal of Physics: Conference Series*. APITECH-2019. – 2019. DOI: [10.1088/1742-6596/1399/5/055048](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1399/5/055048)
13. Zhu J., Wang J. Power loss minimization in industrial power systems with reactive power control // *In Industry Applications Society Annual Meeting (IAS) IEEE*. – 2012. – P. 1–8. DOI: <https://doi.org/10.1109/IAS.2012.6373976>
14. Chao Y., Cheng L. Voltage control and reactive power optimization in distribution systems using a multi-objective approach // *Journal of Electrical Engineering & Technology*. – 2015. – Vol. 10 (5). – P. 2176–2185. DOI: <https://doi.org/10.5370/JEET.2015.10.5.2176>
15. Taslimov A.D., Rakhmonov I.U. Optimization of complex parameters of urban distribution electric networks // *Journal of Physics: Conference Series*. APITECH-2019. – 2019. DOI: [10.1088/1742-6596/1399/5/055046](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1399/5/055046)
16. Optimal reactive power dispatch with discrete control variables considering voltage stability / M. Mohammadi, R. Najafi, F. Khatami // *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. – 2013. – Vol. 45 (1). – P. 200–207. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2012.09.012>
17. Rahmani-Andebili M. Adaptive robust optimization for reactive power management // *IEEE Transactions on Power Systems*. – 2016. – Vol. 31 (4). – P. 3184–3193. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2015.2481898>
18. Research on the ablation resistance of TiC particle-reinforced aluminium-based composite coatings on armature surface / C. Fan, L. Zhang, N.N. Kurbonov, I.U. Rakhmonov, G. Wang // *Coatings*. – 2024. – Vol. 14. – № 549. DOI: <https://doi.org/10.3390/coatings14050549>
19. Sulaiman M.H., Mohamed M.R., Hannan M.A. Artificial bee colony based optimization technique for reactive power optimization // *Applied Soft Computing*. – 2015. – Vol. 13 (1). – P. 360–371. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2012.10.029>
20. Liu X., Tang G., Li S. Coordinated control of reactive power and voltage for active distribution networks using improved particle swarm optimization // *Frontiers in Energy Research*. – 2015. – Vol. 3 (2). – P. 45–57. DOI: <https://doi.org/10.3389/fenrg.2015.00045>
21. Zhang H., Liu G., Wu J. Reactive power optimization in distribution networks of new power systems based on multi-objective particle swarm optimization // *Energies*. – 2021. – Vol. 14 (12). – № 1234. DOI: <https://doi.org/10.3390/en14123234>
22. Effect of heat treatment on structure of carbon shell-encapsulated pt nanoparticles for fuel cells / K. Davletbaev, S.S. Chougule, J. Min, K. Ko, Y. Kim, H. Choi, Y. Choi, A.A. Chavan, B. Pak, I.U. Rakhmonov et al. // *Nanomaterials*. – 2024. – Vol. 14. – № 924. DOI: <https://doi.org/10.3390/nano14110924>
23. Chen C., Liu H. Optimal reactive power flow based on parallel particle swarm optimization algorithm // *Energy*. – 2018. – Vol. 150. – P. 27–35. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.02.034>
24. Wang J. et al. Trap distribution and along-surface discharge characterization of aromatic compound-modified silicone gel // *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. – 2024. DOI: [10.1109/TDEI.2024.3456096](https://doi.org/10.1109/TDEI.2024.3456096)

25. Прогнозирование электропотребления с использованием метода главных компонент (PCA) / И.У. Рахмонов, В.Я. Ушаков, Н.Н. Ниёзов, Н.Н. Курбонов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 12. – С. 198–209. DOI: 10.18799/24131830/2024/12/4731

Информация об авторах

Икромжон Усмонович Рахмонов, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой электро-снабжения Ташкентского государственного технического университета, Узбекистан, 100095, г. Ташкент, ул. Университетская, 2. ilider1987@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0003-2076-5919>

Нуъмон Низомиддинович Ниёзов, доктор философии по техническим наукам, доцент кафедры электро-снабжения Ташкентского государственного технического университета, Узбекистан, 100095, г. Ташкент, ул. Университетская, 2. nomon.niyozov_2422@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-1031-3460>

Комолиддин Бахриддинович Ниматов, старший преподаватель кафедры электроэнергетики Каршин-ский инженерно-экономический институт, Узбекистан, 180100, г. Карши, ул. Мастакилик, 225. k.b.nimatov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-4579-1160>

Василий Яковлевич Ушаков, заслуженный деятель науки и техники РФ, доктор технических наук, профессор Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. vyush@tpu.ru, Узбекистан, 230100, г. Нукус, ул. Ч. Абдирова, 1. <https://orcid.org/0000-0003-2931-2086>

Фахриддин Бердиёр угли Омонов, доктор философии по техническим наукам, доцент, заведующий кафедрой Термезского инженерно-технологического института, Узбекистан, 190100, г. Термез, ул. И. Каримова, 288-А. faxriomomov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-0303-9704>

Камал Мамбеткаримович Реймов, доктор философии по техническим наукам, доцент, заведующий кафедрой электроэнергетики Каракалпакского государственного университета, Узбекистан, 230100, г. Нукус, ул. Ч. Абдирова, 1. kamal_tstu@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2520-6422>

Айсулу Махмудовна Нажимова, доктор философии по техническим наукам, доцент кафедры электроэнергетики Каракалпакского государственного университета, Узбекистан, 230100, г. Нукус, ул. Ч. Абдирова, 1. a_najimova@karsu.uz, <https://orcid.org/0009-0001-7336-8362>

Поступила в редакцию: 11.06.2024

Поступила после рецензирования: 14.01.2025

Принята к публикации: 03.02.2025

REFERENCES

1. Adhikari R., Agnihotri G. Optimal placement of reactive power compensators to reduce losses using genetic algorithm. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2013, vol. 44 (1), pp. 929–936. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2012.08.001>
2. Azevedo G.M., Correia P.F. Optimal reactive power control in distribution networks using genetic algorithms. *Electric Power Systems Research*, 2016, vol. 137, pp. 29–37. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2016.03.023>
3. Rakhmonov I.U., Ushakov V.Ya., Niyozov N.N., Kurbonov N.N. Forecasting electricity consumption by LSTM neural network. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2023, vol. 334, no. 2, pp. 125–133. (In Russ.) Available at: <https://doi.org/10.18799/24131830/2023/12/4407> (accessed 15 September 2023).
4. Ebrahimi A., Ghavidel S., Li L., Zhang J. A multi-objective optimization approach to improve reactive power dispatch considering voltage stability. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2018, vol. 99, pp. 280–293. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2018.02.022>
5. Kirschbaum C., Verstege J.A. Reactive power control for loss minimization in smart grids with high penetration of renewable energy sources. In *Innovative Smart Grid Technologies (ISGT), IEEE PES*, 2012. pp. 1–8. DOI: <https://doi.org/10.1109/ISGT.2012.6175715>
6. Rakhmonov I.U., Ushakov V.Ya., Najimova A.M., Obidov K.K., Suleimanov S.R. Mathematical modeling of minimization of electricity consumption by industrial enterprises with continuous production. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 4, pp. 43–51. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.18799/24131830/2024/4/4423>
7. Li G., Zhang H., Bo R. A novel method to reduce power loss using distributed reactive power control. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2014, vol. 61, pp. 188–193. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2014.03.021>
8. Liao H., Chuang C.S., Lu L. Hybrid ant colony optimization with particle swarm optimization for power losses minimization considering voltage stability in power system. *Journal of Electrical Engineering & Technology*, 2012, vol. 7 (2), pp. 246–254. DOI: <https://doi.org/10.5370/JEET.2012.7.2.246>
9. Rakhmonov I.U., Reymov K.M. Regularities of change of energy indicators of the basic technological equipment of the cotton cleaning industry. *Journal of Physics: Conference Series. APITECH-2019*. DOI: 10.1088/1742-6596/1399/5/055038.
10. Naderi E., Abdollahzadeh H., Narimani H. A new modified teaching-learning algorithm for optimal reactive power dispatch problem with discrete control variables. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2013, vol. 26 (10), pp. 2282–2292. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2013.05.012>

11. Shahgholian G., Moghaddam M.P. Optimal reactive power dispatch for improving voltage profile and reducing power loss using a novel teaching-learning-based optimization algorithm. *Applied Soft Computing*, 2018, vol. 64, pp. 52–67. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2017.11.012>
12. Rakhmonov I.U., Reymov K.M., Najimova A.M., Ushakov V.Ya., Seytmuratov B.T. Analysis and calculation of optimum parameters of electric arc furnace. *Journal of Physics: Conference Series*. DOI: 10.1088/1742-6596/1399/5/055048.
13. Zhu J., Wang J. Power loss minimization in industrial power systems with reactive power control. *In Industry Applications Society Annual Meeting (IAS) IEEE – 2012*, pp. 1–8. DOI: <https://doi.org/10.1109/IAS.2012.6373976>
14. Chao Y., Cheng L. Voltage control and reactive power optimization in distribution systems using a multi-objective approach. *Journal of Electrical Engineering & Technology*, 2015, vol. 10 (5), pp. 2176–2185. DOI: <https://doi.org/10.5370/JEET.2015.10.5.2176>
15. Taslimov A.D., Rakhmonov I.U. Optimization of complex parameters of urban distribution electric networks. *Journal of Physics: Conference Series*. APITECH-2019. DOI: 10.1088/1742-6596/1399/5/055046.
16. Mohammadi M., Najafi R., Khatami F. Optimal reactive power dispatch with discrete control variables considering voltage stability. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2013, vol. 45 (1), pp. 200–207. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2012.09.012>
17. Rahmani-Andebili M. Adaptive robust optimization for reactive power management. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2016, vol. 31 (4), pp. 3184–3193. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2015.2481898>
18. Fan C., Zhang L., Kurbonov N.N., Rakhmonov I.U., Wang G. Research on the ablation resistance of tic particle-reinforced aluminium-based composite coatings on armature surface. *Coatings*, 2024, vol. 14, no. 549. DOI: <https://doi.org/10.3390/coatings14050549>
19. Sulaiman M.H., Mohamed M.R., Hannan M.A. Artificial bee colony based optimization technique for reactive power optimization. *Applied Soft Computing*, 2015, vol. 13 (1), pp. 360–371. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2012.10.029>
20. Liu X., Tang G., Li S. Coordinated control of reactive power and voltage for active distribution networks using improved particle swarm optimization. *Frontiers in Energy Research*, 2015, vol. 3 (2), pp. 45–57. DOI: <https://doi.org/10.3389/fenrg.2015.00045>
21. Zhang H., Liu G., Wu J. Reactive power optimization in distribution networks of new power systems based on multi-objective particle swarm optimization. *Energies*, 2021, vol. 14 (12), no.1234. DOI: <https://doi.org/10.3390/en14123234>
22. Davletbaev K., Chougule S.S., Min J., Ko K., Kim Y., Choi H., Choi Y., Chavan A.A., Pak B., Rakhmonov I.U. Effect of heat treatment on structure of carbon shell-encapsulated pt nanoparticles for fuel cells. *Nanomaterials*, 2024, vol. 14, no. 924. DOI: <https://doi.org/10.3390/nano14110924>
23. Chen C., Liu H. Optimal reactive power flow based on parallel particle swarm optimization algorithm. *Energy*, 2018, vol. 150, pp. 27–35. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.02.034>
24. Wang J. Trap distribution and along-surface discharge characterization of aromatic compound-modified silicone gel. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2024. DOI: 10.1109/TDEI.2024.3456096
25. Rakhmonov I.U., Ushakov V.Ya., Niyozov N.N., Kurbanov N.N. Forecasting electricity consumption using the principal component analysis method. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 334, no. 2, pp. 198–209. (In Russ.) DOI: 10.18799/24131830/2024/12/4731

Information about the authors

Ikromjon U. Rakhmonov, Dr. Sc., Professor, Tashkent State Technical University, 2, Universitetskaya street, Tashkent, 100095, Uzbekistan. ilider1987@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0003-2076-5919>

Numon N. Niyozov, PhD, Associate Professor, Tashkent State Technical University, 2, Universitetskaya street, Tashkent, 100095, Uzbekistan. nomon.niyozov_2422@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-1031-3460>

Komoliddin B. Nimatov, Senior Lecturer, Karshi Engineering and Economics Institute, 225, Mustakillik street, Karshi, 180100, Uzbekistan. k.b.nimatov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-4579-1160>

Vasily Ya. Ushakov, Dr. Sc., Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. vyush@tpu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2931-2086>

Fakhriddin B. Omonov, PhD, Associate Professor, Termez Institute of Engineering and Technology, 288 A, Islam Karimov street, Termez, 190100, Uzbekistan. faxriomonov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-0303-9704>

Kamal M. Reymov, PhD., Associate Professor, Karakalpak State University, 1, Ch. Abdirov street, Nukus, 230100, Uzbekistan. kamal_tstu@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2520-6422>

Aysulu M. Najimova, PhD., Associate Professor, Karakalpak State University, 1, Ch. Abdirov street, Nukus, 230100, Uzbekistan. a_najimova@karsu.uz, <https://orcid.org/0009-0001-7336-8362>

Received: 11.06.2024

Revised: 14.01.2025

Accepted: 03.02.2025

УДК 62-6

DOI: 10.18799/24131830/2025/2/4914

Шифр специальности ВАК: 2.4.6

Влияние системы воздухообмена на температурный режим локальной рабочей зоны крупногабаритного помещения при работе газового инфракрасного излучателя

Б.В. Борисов[✉], А.В. Вяткин, Г.В. Кузнецов, В.И. Максимов, Т.А. Нагорнова

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск

[✉]bvborisov@tpu.ru

Аннотация. Актуальность. Проблема энергосбережения и энергоэффективности с каждым годом становится все более актуальной по ряду причин. Используемые в настоящее время конвективные системы отопления во многих случаях уже неэффективны. Особенно в случае крупногабаритного частично загруженного промышленным оборудованием помещения, в котором такие системы обогревают все помещение, увеличивая затраты теплоты сверх необходимого. Газовые инфракрасные излучатели в этом случае более перспективны, поскольку создают регламентные тепловые режимы в выбранных локальных рабочих зонах. Однако их применение в настоящее время все еще не широко распространено из-за ряда нерешенных проблем по технологии их применения. Одной из таких проблем является пока еще недостаточно проанализированное влияние работы систем воздухообмена на тепловой режим локальных рабочих зон. **Цель:** определение воздействия систем воздухообмена на тепловые характеристики в локальной рабочей зоне производственного помещения, отапливаемого газовым инфракрасным излучателем. **Объект:** рабочая зона с системой вентиляции и обогреваемая газовым инфракрасным излучателем. **Методы:** экспериментальные и численные исследования. **Результаты.** Зарегистрированы экспериментально и определены в результате математического моделирования температурные поля, тепловые потоки и скорости воздуха. Установлено, что интенсивность подачи относительно холодного воздуха системой воздухообмена влияет на тепловой режим локальной рабочей зоны. При малой интенсивности поток холодного (относительно) воздуха направляется вниз, не взаимодействуя с газовым инфракрасным излучателем, при более высокой интенсивности поступающий из системы воздухообмена воздух достигает поверхности, нагретой до высоких температур (800 °С) газовым инфракрасным излучателем. И достигает локальной рабочей зоны уже достаточно прогретым. Сделан вывод, что системы лучистого отопления локальных рабочих зон могут обеспечить плановый тепловой режим в этих зонах с интенсивностью воздухообмена, характерной для реальных производственных помещений.

Ключевые слова: математическое моделирование, экспериментальные исследования, тепловой режим, газовый инфракрасный излучатель, система вентиляции

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Научного Фонда (проект № 20-19-00226).

Для цитирования: Влияние системы воздухообмена на температурный режим локальной рабочей зоны крупногабаритного помещения при работе газового инфракрасного излучателя / Б.В. Борисов, А.В. Вяткин, Г.В. Кузнецов, В.И. Максимов, Т.А. Нагорнова // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 2. – С. 172–189. DOI: 10.18799/24131830/2025/2/4914

UDC 62-6

DOI: 10.18799/24131830/2025/2/4914

Impact of the air exchange system on temperature conditions of the local working area of a large-sized premise during the gas infrared heater operation

B.V. Borisov[✉], A.V. Vyatkin, G.V. Kuznetsov, V.I. Maksimov, T.A. Nagornova

National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

[✉]bvborisov@tpu.ru

Abstract. Relevance. The problem of energy saving and energy efficiency is becoming more and more urgent every year for a variety of reasons. Traditional convective heating systems are no longer effective in many cases (especially in case of large-sized partially loaded with industrial equipment). Gas infrared emitters are promising sources for heating local working areas. However, their use is not very widespread due to a number of unresolved problems with radiant heating technologies for local workplaces. One of these problems is the air exchange systems operation, the effect of which on the local working areas thermal conditions has not been studied yet. **Aim.** Determining the impact of air exchange systems on the thermal characteristics in the local working area of a production facility heated by a gas infrared heater. **Objects.** Working area with ventilation and heated by gas infrared heaters. **Methods.** Experimental and theoretical studies. **Results.** The authors have registered the temperature fields, heat flows and air velocities and carried out the mathematical modeling in the gas infrared heaters effect zone. It was found that supply of relatively cold air (at low flow rates) from the air exchange system slightly affects the thermal conditions of the local working area. The air coming from the air exchange system flows around the gas infrared emitter heated up to high temperatures (800°C). As a result, air comes to the local working area already sufficiently heated. It was concluded that the radiant heating systems of local working areas can provide scheduled thermal conditions in these areas with the intensity of air exchange typical for real industrial premises.

Keywords: mathematical modeling, experimental studies, thermal regime, gas infrared heater, air exchange system

Acknowledgements: This work was supported by the Russian Science Foundation (grant number 20-19-00226).

For citation: Borisov B.V., Vyatkin A.V., Kuznetsov G.V., Maksimov V.I., Nagornova T.A. Impact of the air exchange system on temperature conditions of the local working area of a large-sized premise during the gas infrared heater operation. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 2, pp. 172–189. DOI: 10.18799/24131830/2025/2/4914

Введение

Общая проблема энергосбережения [1–6], а точнее энергоэффективности, становится в последнее время особенно важной при формировании регламентных тепловых режимов в крупногабаритных промышленных помещениях [7–10] с частично загруженными производственными площадями. При этом строительство и промышленное производство являются основными потребителями теплоты и электрической энергии с выбросом в атмосферу огромного количества углекислого газа [1, 11]. Некоторые европейские правительства добиваются цели довести все выбросы CO₂ до нуля к 2050 г. [12]. Одним из способов достижения этой цели может быть повышение энергоэффективности самого промышленного производства [13–17]. Другим подходом к повышению энергоэффективности предприятия является разумное использования тепловых источников для создания комфортных условий жизнедеятельности. На обеспечение ком-

фортности среды жизнеобеспечения системами отопления, вентиляции и кондиционирования (ОВиК) расходуется основная часть энергопотребления здания, поэтому регламентный микроклимат в помещении при минимизации затраченной теплоты может быть достигнут путем применения рационального подхода к выбору методов распределения ее в рабочих зонах [18, 19]. Так, применение водяных калориферов для отопления больших промышленных зданий [20–23] приводит к тому, что значительное количество теплоты, переданное от этих тепловых приборов воздуху, теряется им при теплообмене в ограждающих конструкциях и аккумулируется вблизи потолочного перекрытия [14, 24], а работники предприятия испытывают температурный дискомфорт. Находящаяся вне регламентного диапазона (слишком высокая или слишком низкая) температура в помещении в конце концов сказывается на здоровье и, соответственно, на производительности труда работающих [25, 26].

По результатам многочисленных исследований, например, [27–30], установлено, что тепловой комфорт во многих случаях достигается с меньшими энергозатратами при использовании систем лучистого нагрева (по сравнению с конвективной системой) [31–36].

Однако для создания таких эффективных систем управления тепловыми режимами локальных рабочих мест в крупногабаритных производственных помещениях (например, [30–33]) и их широкого практического использования требуется понимание процессов их формирования в отдельных локальных зонах. Очень важно определить, на сколько эффективно используются тепловые потоки, вырабатываемые газовыми инфракрасными излучателями (ГИИ). Частично эта проблема решена при анализе процессов переноса теплоты от ГИИ без учета работы системы воздухообмена [37] в режиме естественной конвекции.

Экспериментальные исследования

Условия проведения представленных экспериментальных исследований процессов теплопереноса выбирались на основе анализа примеров регламентных тепловых режимов локальных рабочих зон крупногабаритных помещений [30, 38–42].

Учитывалось [40, 41], что анализ тепловых потоков и температур по большим площадям в условиях работы нескольких (3–4) ГИИ можно заменить анализом ряда одинаковых локальных участков, каждый из которых нагревается одним излучателем. По ранее экспериментально определенным

зависимостям плотности тепловых потоков, поступающих в рабочую зону от ГИИ различной мощности (от 5 до 30 кВт), и их расположению относительно обогреваемой поверхности [30, 40] сделан вывод о применимости ГИИ малой мощности для подвода теплоты к локальной рабочей области. В связи с установленными в [30] закономерностями при проведении экспериментов использовался один ГИИ средней мощности (5 кВт), расположенный на относительно малой высоте (3 м) от поверхности пола экспериментального бокса.

Экспериментальные исследования проводились в зимнее время при температуре наружного воздуха T_e от -12 до -30 °С (ниже приведены типичные результаты экспериментов при $T_e = -22$ °С). Начальные температуры воздуха в экспериментальном боксе устанавливались от $+2$ до $+15$ °С. Такие температуры характерны для производственных помещений с двухсменным режимом работы. При этом, как было установлено ранее [24], снижение температуры воздуха в помещении до отрицательных температур в подавляющем большинстве практически значимых вариантов нецелесообразно по целому ряду объективных (производственных) причин. Поэтому основные эксперименты проводились при начальной температуре $+7$ °С в помещении.

На рис. 1 представлено схематическое изображение лабораторного стенда для проведения экспериментальных исследований.

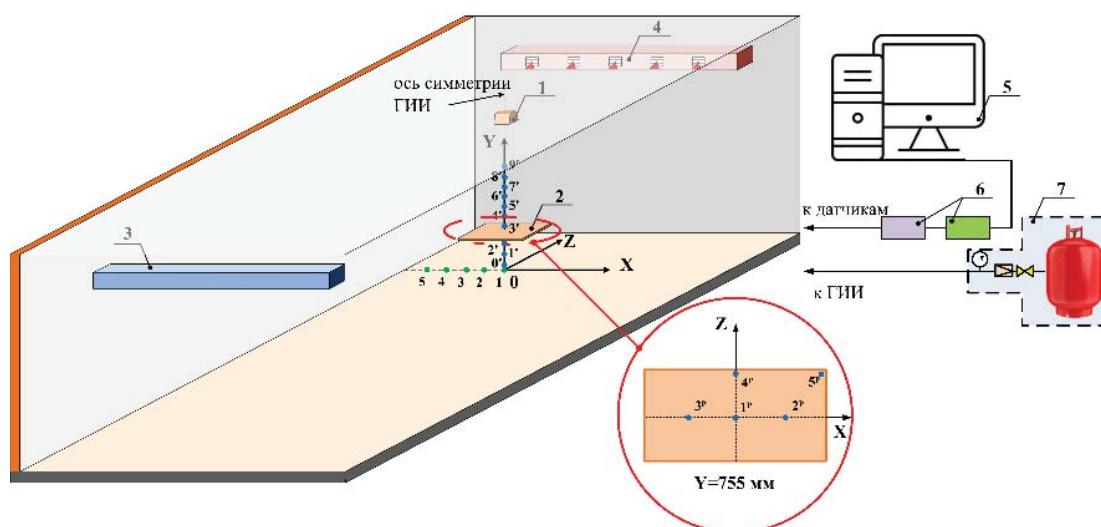


Рис. 1. Схематическое изображение области проведения экспериментов и расположения термодпар: 1 – ГИИ, 2 – выносная горизонтальная панель, 3 – канал притока воздуха, 4 – канал выхода воздуха, 5 – компьютер, 6 – аналого-цифровой преобразователь и системы сбора и передачи данных, 7 – запорно-регулирующая арматура системы газоснабжения

Fig. 1. Schematic representation of the experimental area and the thermocouples location: 1 – gas infrared heater (GIH), 2 – horizontal panel, 3 – inlet air channel, 4 – outlet air channel, 5 – personal computer (PC), 6 – analog-to-digital converter (ADC) and data collection and transmission system, 7 – shut-off and control valves of the gas supply system

Эксперименты с регистрацией основных характеристик процессов теплопереноса проведены в условиях реального объекта теплоснабжения – типичного и достаточно большого по размерам закрытого помещения (рис. 1), соответствующего объекту, использованному для исследований, описанных в работах [31, 32, 39].

На практике локальные рабочие зоны в крупногабаритных помещениях выделяются по ряду технологических условий, как правило, вблизи стен. Поэтому эксперименты проводились в зоне, включающей в качестве основного элемента и несущую стену. Исследования [31, 32, 39] показали, что стены существенным образом участвуют в процессе регулирования движения воздуха в локальных рабочих зонах.

Устройство экспериментального стенда и оборудования принято аналогично описанному в работе [43]. В табл. 1 указаны координаты расположения датчиков температуры в рабочей области.

Также для обоснования выводов об условиях создания регламентных тепловых режимов при работе ГИИ проведен анализ распределений температур воздуха в вертикальном сечении ($0 \leq Y \leq 2,0$ м) на расстоянии 0,2 м слева ($X=0,8$ м) и справа ($X=2,4$ м) от панели (рис. 1). Предполагалось, что в этой зоне должен находиться работающий.

Обработка результатов измерений проводилась персональной ЭВМ. Типичные примеры распределения температур во времени в двенадцати точках области анализа (осциллограммы) приведены на рис. 2–5. Для обеспечения возможности оценки случайных ошибок измерений все эксперименты при постоянных условиях проводились не менее трех раз. После этого рассчитывались среднеквадратические отклонения и соответствующие коэффициенты вариации. В ходе всех экспериментов значения коэффициентов вариации не превышали 4 %. Статистическая обработка результатов измерений была необходима из-за потенциального влияния на показания измерительных приборов небольших отклонений от нормированных значений факторов второго и третьего уровней значимости, таких как влажность воздуха, давление и изменения температуры окружающей среды в ходе длительных экспериментов. Хотя влияние этих факторов является незначительным, согласно основным принципам теории ошибок в экспериментальных исследованиях, их следует учитывать при оценке достоверности полученных результатов.

На рис. 2 приведены распределения полных тепловых потоков по высоте в центре симметрии зоны влияния ГИИ при наличии элемента оборудования (панель) в условиях естественной и смешанной конвекции.

Таблица 1. Координаты расположения термомпар и датчиков теплового потока в области измерений

Table 1. Location coordinates of thermocouples and heat flow sensors in the measurement area

Измерение температур воздуха/Air temperature measurement										
Номера термопар Thermocouple numbers	0'	1'	2'	3'	4'	5'	6'	7'	8'	9'
X, м/м	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Z, м/м	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Y, м/м	0,05	0,4	0,7	0,755	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
Измерение температур пола/Floor temperature measurement										
Номера термопар Thermocouple numbers	0	1	2	3	4	5				
X, м/м	0	-0,2	-0,4	-0,6	-0,8	-1				
Z, м/м	0	0	0	0	0	0				
Y, м/м	0	0	0	0	0	0				
Измерение температуры поверхности панели в зоне влияния ГИИ Measuring the panel surface temperature in the GIH impact zone										
Номера термопар Thermocouple numbers	1 ^p	2 ^p	3 ^p	4 ^p	5 ^p					
X, м/м	0	-0,3	0,3	0	0,6					
Z, м/м	0	0	0	0,28	0,28					
Y, м/м	0,755	0,755	0,755	0,755	0,755					
Измерение тепловых потоков в воздухе на оси симметрии зоны влияния ГИИ Measuring the heat flow in the air on the symmetry axis in the GIH impact zone										
Номера датчиков Sensor numbers	1 ^q	2 ^q	3 ^q	4 ^q	5 ^q					
X, м/м	0	0	0	0	0					
Z, м/м	0	0	0	0	0					
Y, м/м	0,78	1,0	1,2	1,8	2,0					

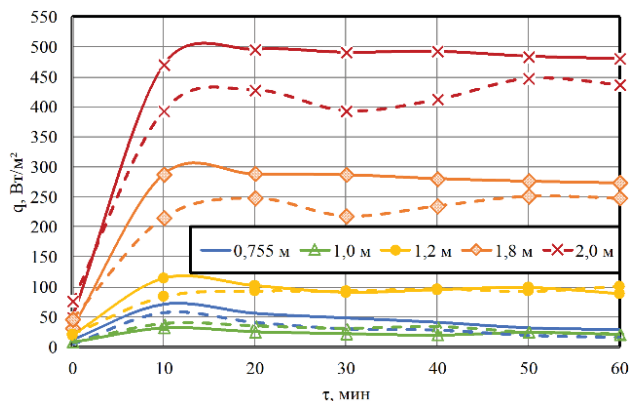


Рис. 2. Изменения с ростом времени полных тепловых потоков в режиме естественной (сплошные линии) и смешанной (пунктирные линии) конвекции при наличии панели в помещении

Fig. 2. Changes of total heat fluxes under natural (solid lines) and mixed (dashed lines) convection conditions in the premise with a panel in it with increasing time

Результаты экспериментов показывают, что в двух рассматриваемых режимах конвекции по мере приближения датчиков к излучателю величина теплового потока (q) значительно увеличивается. При этом влияние смешанной конвекции на интенсивность теплового потока также возрастает с уменьшением расстояния до ГИИ. Например, если при высоте $H=1,2$ м от пола значение теплового потока составляет около 100 Вт/м^2 , то при $H=1,8$ м (на 60 см выше) $q=270 \text{ Вт/м}^2$ (рост в 2,7 раза). На расстояниях от пола до 1,2 м (датчики 1q-3q) смешанная конвекция практически не влияет на вели-

чину теплового потока. Для датчиков 1q и 2q значения теплового потока идентичны, для датчика 3q, находящегося на высоте 1,2 м от пола, разница в данных составляет менее $0,5 \text{ Вт/м}^2$ (0,5 %). По мере приближения к ГИИ влияние притока воздуха из системы воздухообмена становится значительным, тепловой поток в этом случае уменьшается, и на высоте 1,8 м q уже меньше на 25 Вт/м^2 (5,5 %). Это обусловлено интенсификацией движения масс воздуха и, соответственно, конвективного теплообмена в этой области за счет работы приточно-вытяжной системы воздухообмена.

На рис. 3 приведены установленные экспериментально зависимости скорости воздуха и значения температур по высоте помещения на оси симметрии зоны влияния ГИИ от времени.

Около пола под горизонтальной панелью ($Y=0,01$ м) скорость воздуха при работе системы воздухообмена возрастает по сравнению с режимом естественной конвекции в 2 раза (с 0,06 до 0,12 м/с), а на высоте 2 м – в 2,7 раза. Приточно-вытяжная вентиляция интенсифицирует движение воздуха в верхней области зоны влияния ГИИ. В центре области (над панелью) образуется своеобразная застойная зона, скорость воздуха в которой составляет 0,003 м/с (линия 0,755 м, рис. 3, а).

На рис. 4 представлены результаты, характеризующие изменение температур воздуха с ростом времени в точках расположения термпар на оси симметрии зоны влияния ГИИ при двух режимах конвекции (свободной и смешанной) для свободного помещения и с расположенной в нем панелью.

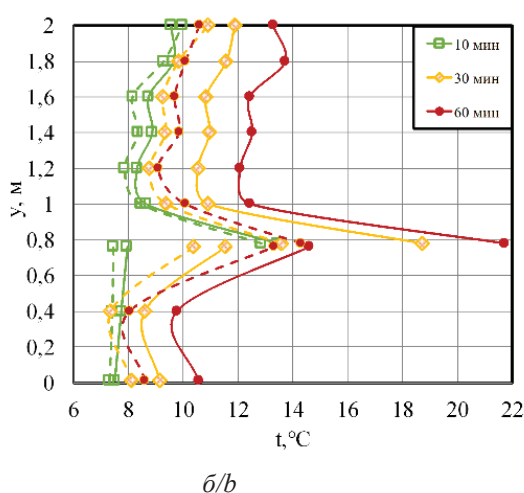
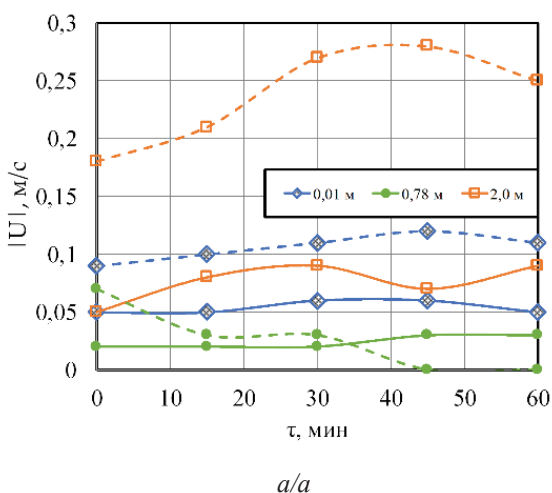


Рис. 3. Изменения с течением времени значений скорости воздуха на разных высотах (а) и распределения температур воздуха по координате Y и поверхности панели ($Y=0,755$ м) на оси симметрии зоны влияния ГИИ

Fig. 3. Changes over time the values of air velocity at different heights (a) and the air temperatures distributions along the Y coordinate and the panel surface ($Y=0,755$ m) on the GIH symmetry axis (b) under natural (solid lines) and mixed (dashed line) convection conditions

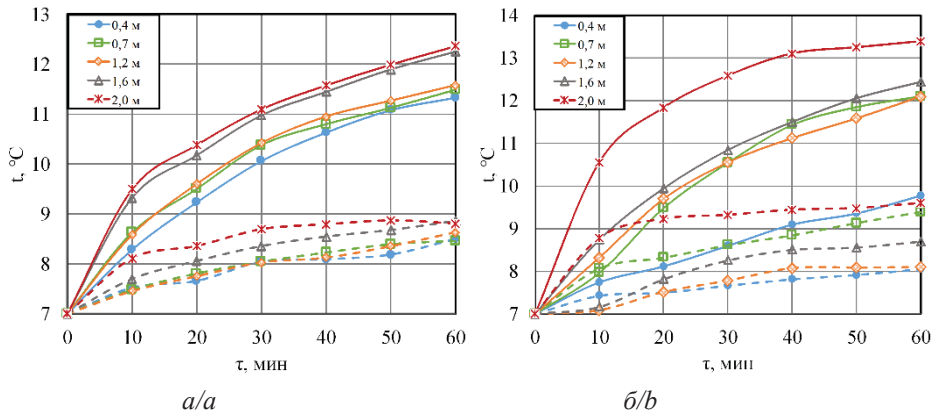


Рис. 4. Изменение температур воздуха с ростом времени в точках расположения термодпар на оси симметрии зоны влияния ГИИ в режиме естественной (сплошные линии) и смешанной конвекции (пунктирные линии): а) помещение без оборудования, б) панель расположена на высоте 755 мм от пола

Fig. 4. Air temperatures change with increasing time at GII symmetry axis for natural (solid lines) and mixed (dashed line) convection conditions in premise: а) without a panel, б) premise with a panel located at a height of 0.755 m from the floor

Результаты экспериментов показывают, что смешанная конвекция, обусловленная работой систем воздухообмена, приводит к перемешиванию воздушных масс и более интенсивному охлаждению поверхности горизонтальной панели (температура снижается на 7,5 °С, рис. 3, б), а также воздуха (температура снижается на 4–5 °С, рис. 4) по сравнению с режимом естественной конвекции.

При этом разница в значениях температуры воздуха для различных условий его движения уменьшается по мере удаления от ГИИ и на высоте 0,4 м от пола составляет уже 3 °С в свободном помещении (рис. 4, а) и 1,7 °С в помещении с панелью (рис. 4, б).

Приведенные на рис. 5 результаты иллюстрируют неоднородность температурного поля в рабочих зонах на расстоянии 20 см слева и справа от панели. Перепад t по высоте (от 0,2 до 2 м) составляет до 3,5 градусов Цельсия. В этих сечениях (где предпо-

жительно должен находиться работающий) влияние работы системы воздухообмена на температуру воздуха уже не так существенно (разница температур не более 1,1 °С). При этом в отличие от температур воздуха над панелью на оси симметрии зоны влияния ГИИ, где заметно их снижение в результате работы системы вентиляции, значения температур воздуха становятся выше.

Установленный (достаточно неочевидный) эффект обусловлен, скорее всего, тем, что приточный относительно холодный воздух вовлекает в процесс формирования теплового режима локальной рабочей зоны воздух, находящийся непосредственно вблизи излучателя и вследствие теплопроводности нагретый до очень высоких (более 600 °С) температур. Ранее установлено [5], что в режиме естественной конвекции эта теплота отводится через перекрытие во внешнюю среду и почти не влияет на тепловой режим локальной рабочей зоны.

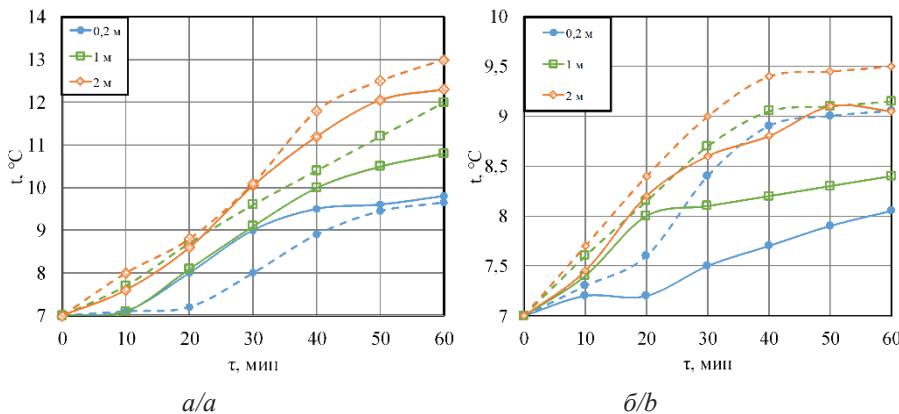


Рис. 5. Изменение температур воздуха на различных высотах в сечениях 200 мм от панели слева (а) и справа (б) в режиме естественной (сплошные линии) и смешанной (пунктирные линии) конвекции

Fig. 5. Air temperatures changes at different heights in sections of 0.2 m from the panel to the left (а) and to the right (б) in the natural (solid lines) and mixed (dashed lines) convection conditions

Численные исследования

Математическое моделирование осуществлялось в рамках двумерного подхода. Рассматривалась прямоугольная область размерами $L_x=10 \times L_y=4,4$ м, ограниченная ограждающими конструкциями толщиной 0,1 м (рис. 6) и двумя горизонтальными конструктивными элементами. Также в рассматриваемой зоне расположены области, соответствующие излучателю ГИИ (размеры $L_{x_{GII}}=0,4$ м, $L_{y_{GII}}=0,05$ м), и панели (размеры $L_{x_{tb}}=0,6$ м, $L_{y_{tb}}=0,04$ м). Позиционирование источника лучистой энергии (ГИИ) и горизонтальной панели в этой области было определено в соответствии с наиболее распространенными вариантами их установки в реальных помещениях, что иллюстрируется на рис. 1.

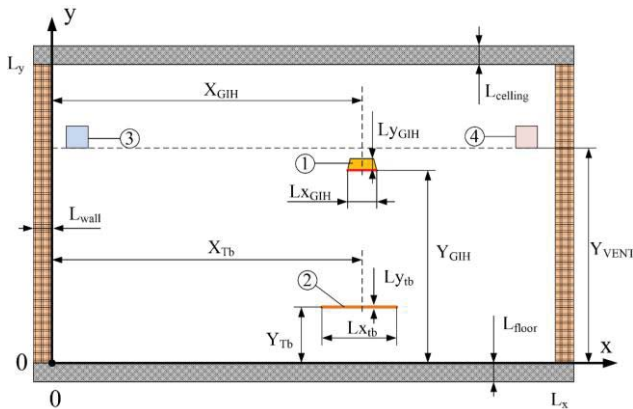


Рис. 6. Область решения задачи: 1 – ГИИ, 2 – Панель, 3 – Зона притока воздуха, 4 – Зона оттока воздуха

Fig. 6. Solution area: 1 – GII, 2 – Horizontal panel, 3 – Air inlet zone, 4 – Air outlet zone

Координаты (X_{tb} , Y_{tb}) центра верхней границы поверхности горизонтальной выносной панели, характеризующей оборудование, которое может быть расположено в рабочей зоне, варьировались по направлениям x и y . Давление воздуха принято

известной величиной $P_{air}=0,1$ МПа и не изменялось во всей области решения со временем. При моделировании теплопереноса излучением воздух считался диатермичной средой, а все поверхности (стен, пола, потолка, ГИИ и оборудования) – непрозрачными серыми. Для решения поставленной задачи используется математическая модель, идентичная описанной в работах [43, 44].

Перед началом математического моделирования тепломассопереноса была проведена проверка физической адекватности задачи. Это осуществлялось через сопоставление результатов численного моделирования с данными, полученными в ходе экспериментальных исследований. Достигнутое хорошее соответствие между физическим и математическим моделированием дало возможность применять выбранную модель для анализа воздействия воздухообмена на температуры в локальной рабочей зоне, находящейся под влиянием ГИИ.

На рис. 7, 8 представлены полученные при численном решении выше сформулированной задачи поля температур и скоростей воздуха для помещения, свободного от оборудования и при его наличии. Результаты представлены для момента времени $\tau=60$ мин, как и в случае экспериментальных исследований. Приток воздуха с расходом $2 \cdot 10^{-4}$ кг/(с·м³) соответствовал условиям проведенных экспериментов.

На рис. 7, а и 8, а хорошо заметно, что прогрев слоев воздуха вблизи нижней ограждающей конструкции осуществляется за счет передачи тепла от нагревающегося излучением ГИИ пола. Температура на границе раздела сред «нижняя ограждающая конструкция – воздух» повышается к 60 минуте работы ГИИ до 9 °С (рис. 7, а). Для варианта с наличием панели в помещении температурный режим (рис. 8, а) и структура течения воздуха (рис. 8, б) меняются. В рассматриваемом случае панель располагалась на высоте $Y_{tb}=755$ мм с центром на проекции оси симметрии ГИИ ($X_{tb}=6415$ мм).

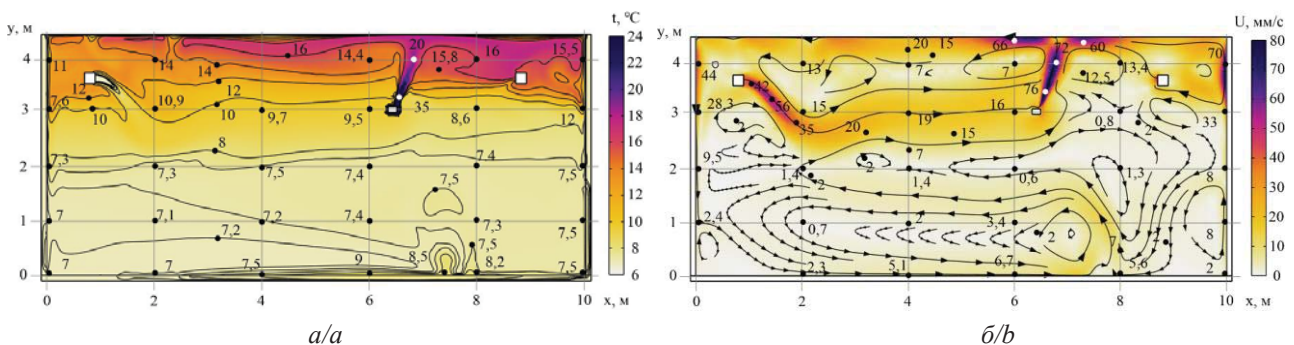


Рис. 7. Температурное поле (а) и линии тока (б) в свободном помещении в режиме смешанной конвекции при расходе воздуха $2 \cdot 10^{-4}$ кг/(с·м³)

Fig. 7. Temperature field (a) and streamlines (b) in a free premise in the mixed convection condition with air flow rate of $2 \cdot 10^{-4}$ kg/(с·м³)

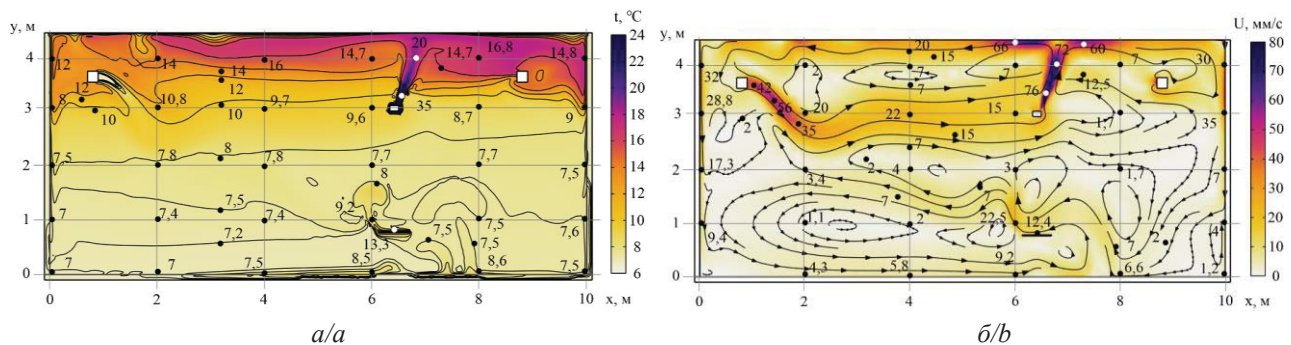


Рис. 8. Температурное поле (а) и линии тока (б) в помещении с панелью, расположенной на высоте 755 мм от пола в режиме смешанной конвекции при расходе воздуха $2 \cdot 10^{-4} \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^3)$

Fig. 8. Temperature field (a) and streamlines (b) in a premise with a panel located at a height of 0.755 m from the floor in mixed convection condition with air flow rate of $2 \cdot 10^{-4} \text{ kg}/(\text{s} \cdot \text{m}^3)$

Наличие даже небольших (размер по координате X составляет 60 см) элементов оборудования вносит изменение в температурные поля и структуру движения воздуха (рис. 8). Также нагреваясь под действием теплового излучения от ГИИ, горизонтальная панель приводит к повышению температуры на $2,5^\circ\text{C}$ в верхней (Y от 755 до 2000 мм) области локальной рабочей зоны. Горизонтальная панель выполняет роль экрана по отношению к полу, основной тепловой поток приходится на её поверхность, в результате происходит прогрев поверхности панели до $14,5^\circ\text{C}$ (рис. 9, б). Над панелью формируется зона нагретого до $9,2^\circ\text{C}$ воздуха (рис. 8, а), который достаточно интенсивно (со скоростью 25 мм/с) поднимается вверх (рис. 8, б).

Область под панелью практически не испытывает нагрева (рис. 8, а), поскольку тепловое излучение от ГИИ не достигает поверхности пола. Температура

в этой зоне увеличивается благодаря притоку нагретых масс из соседних областей (справа и слева), что происходит за счет образовавшихся циркуляционных течений с низкой интенсивностью.

На рис. 9 представлены распределения температур по высоте помещения на оси симметрии зоны влияния ГИИ при наличии панели и без неё, установленные экспериментально и в результате математического моделирования.

Отклонение значений температур, полученных при моделировании и в экспериментах (рис. 11), не превышает 2°C , что позволяет сделать вывод о применимости созданной математической модели для дальнейших исследований и оценки влияния различных параметров работы системы воздухообмена и месторасположения оборудования на структуру перемещения воздуха и тепловых потоков в помещении.

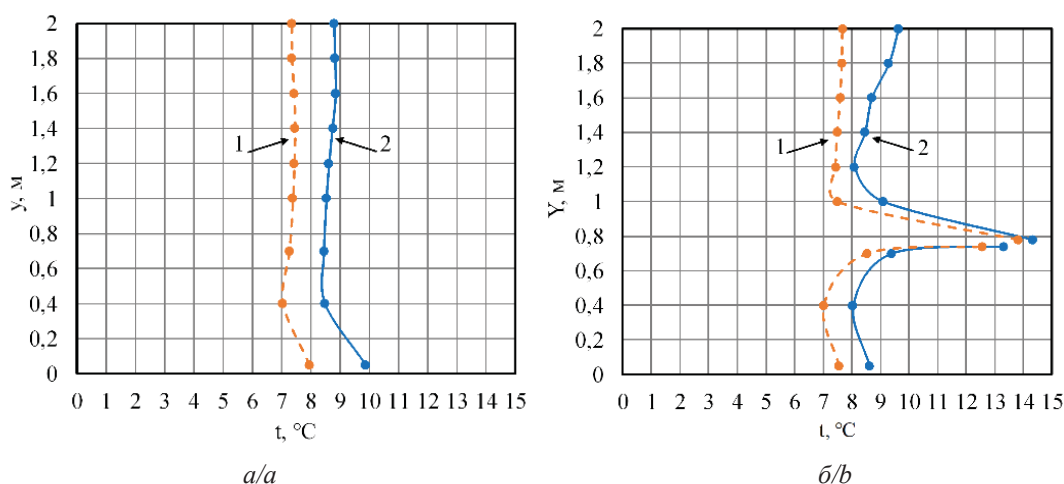


Рис. 9. Распределение экспериментальных (1) и теоретических (2) значений температуры воздуха по координате Y на оси симметрии зоны влияния ГИИ ($\tau=60$ минут): а) свободное помещение, б) панель (оборудование) расположена на высоте 755 мм от пола

Fig. 9. Distribution of experimental (1) and theoretical (2) air temperature values along the Y coordinate on the GII symmetry axis ($\tau=60$ minutes): а) premise without a panel, б) premise with a panel (equipment) located at a height of 0.755 m from the floor

Результаты численного моделирования

Исходя из требований практики необходим анализ влияния интенсивности притока воздуха из системы воздухообмена на температурные поля и поля скоростей.

Анализ результатов численного моделирования показывает, что к 60-ой минуте со времени начала работы ГИИ в помещении устанавливается квазистационарный режим, который характеризуется медленным изменением температур и скоростей потока воздуха во всей области решения. Момент времени выхода на такой режим и был выбран для всех иллюстраций. Поскольку к основным характеристикам при оценке микроклимата, как в локальной рабочей зоне, так и во всем помещении, относятся температуры и скорости перемещения воздуха [7–10], проводился анализ температурных полей и полей скоростей.

На рис. 10–15 представлены типичные результаты математического моделирования процесса теплопереноса в помещении при работе ГИИ для двух вариантов: работы системы воздухообмена (смешанная конвекция) и в условиях естественной конвекции. Температурные поля и поля скоростей движения воздуха в условиях смешанной конвекции (притока относительно холодного воздуха) показаны при условии расположения в помещении панели на высоте 755 мм от пола (более практически значимый вариант), но при разных расходах воздуха из системы воздухообмена.

Исходные данные для основных вариантов представлены в табл. 2. При наличии в расчетах горизонтальной панели последняя располагалась строго под ГИИ с совпадением осей симметрии. При проведении численного моделирования использовались следующие значения характерных температур: начальная температура в помещении – 7 °С; температура излучающей поверхности ГИИ – 800 °С; температура на входе приточной вентиляции – 7 °С;

Таблица 2. Варианты расчетов при наличии (отсутствии) горизонтальной панели в рассматриваемой области и величин массовых расходов воздуха

Table 2. Calculation options with (without) a horizontal panel in the considered area and the values of air mass flow rates

Наличие панели Availability of the panel	Расход воздуха, кг/(с·м³) Air flow, kg/(s·m³)	Номер рисунка Figure number
Панель отсутствует No panel	$2 \cdot 10^{-4}$	7, 9
Панель присутствует Panel available	0	8, 9
	$1 \cdot 10^{-4}$	10
	$2 \cdot 10^{-4}$	11, 16–20
	$11 \cdot 10^{-4}$	12, 16–20
	$22 \cdot 10^{-4}$	13, 16–20
	$33 \cdot 10^{-4}$	14, 16–20

Рис. 10, 11 характеризуют процесс теплопереноса в помещении при работе ГИИ для двух вариантов: работы системы воздухообмена (смешанная конвекция, рис. 11) и в условиях естественной конвекции (рис. 10). Для оценки влияния термогравитационной и вынужденной конвекции использовано число Ричардсона $Ri = Gr/Re^2$ [10]. Есть определенная проблема в данном случае при выборе масштабных величин для вычисления значений чисел Грасгоффа (Gr) и Рейнольдса (Re). Их анализ проводился с использованием следующих параметров: максимальное значение температурного напора над горизонтальной панелью, ширина помещения и средне-расходная скорость притока воздуха в помещении из системы воздухообмена. Установлено, что при формировании направлений и интенсивности движения воздушных масс при $Ri \gg 1$ существенное значение оказывают термогравитационные потоки.

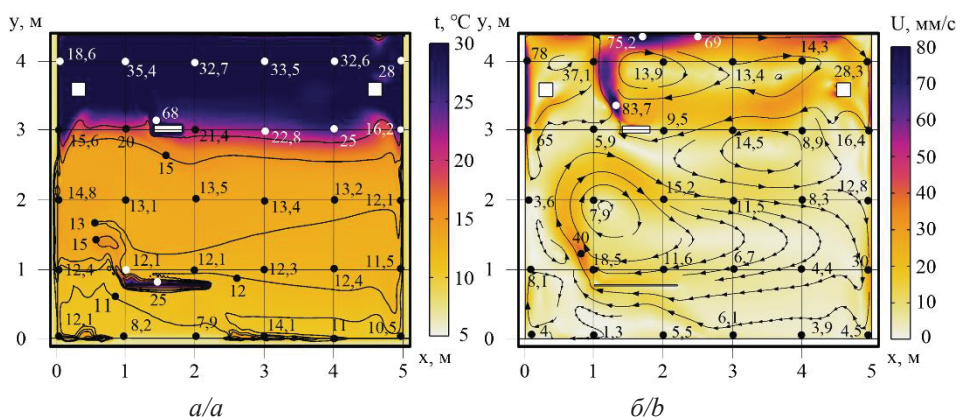


Рис. 10. Поле температур (а) и линии тока (б) для области с панелью при высоте её расположения $Y_{tb}=755$ мм в режиме естественной конвекции

Fig. 10. Temperature field (a) and streamlines (b) for the area with a panel at the height of its location $Y_{tb}=0.755$ m under natural convection conditions

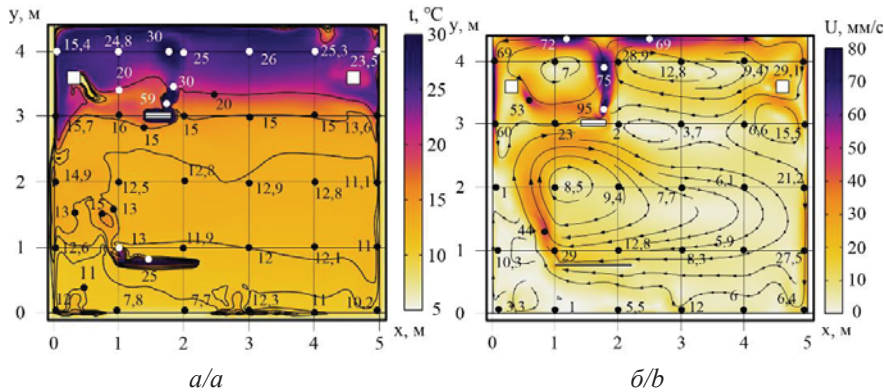


Рис. 11. Поле температур (а) и линии тока (б) для области с панелью (координаты $X_{Tb}=1600$ мм и $Y_{Tb}=755$ мм) в режиме смешанной конвекции при расходе воздуха $1 \cdot 10^{-4}$ кг/(с·м³)

Fig. 11. Temperature field (a) and streamlines (b) for the area with a panel at the height of its location $Y_{Tb}=0.755$ m under mixed convection conditions with air flow rate of $1 \cdot 10^{-4}$ kg/(s·m³)

Анализ результатов рис. 10, 11 показывает, что работа системы воздухообмена существенно изменяет температурное поле и направления потоков воздуха. Относительно холодный воздух внешней среды значительно (в среднем на 10 °C) понижает температуру воздуха в верхней зоне помещения (на уровне $Y=4$ м, рис. 10, а и 11, а). Но в областях на уровне роста работающего влияние системы воздухообмена незначительно (например, в сечении $X=1$ м на высоте $Y=2$ м значения температур составляют 13,1 и 12,5 °C). Приток относительно холодного воздуха из системы воздухообмена усиливает циркуляцию воздуха во всем помещении и локальной зоне вблизи панели (рис. 10, б и 11, б).

При малой интенсивности воздухообмена (расход до $2 \cdot 10^{-4}$ кг/с·м³) более холодный воздух из системы воздухообмена первые 1,5–2,0 м движется с уклоном вниз (рис. 11, 12), постепенно прогреваясь от восходящих потоков. Значительно более сильное влияние термогравитационного воздействия на гидродинамическую картину, чем вынужденной конвекции (потока холодного воздуха), подтвер-

ждает оценка числа Ричардсона ($Ri=755$), определяемого по средне-расходной скорости втекания, максимального перегрева воздуха в районе панели и поперечного характерного размера.

В этом режиме теплообмена при относительно малых расходах ($1 \cdot 10^{-4}$ и $2 \cdot 10^{-4}$ кг/с·м³) нагретые над ГИИ массы газа удаляются через систему вентиляции, что существенно понижает среднюю температуру помещения, улучшает воздухообмен, но не оказывает заметного влияния на температурный режим локальной рабочей зоны.

На рис. 13 представлены результаты, полученные для расхода воздуха $11 \cdot 10^{-4}$ кг/(с·м³). Формируется обширный циркуляционный вихрь по всей области исследования (рис. 13). Нагретый воздух из верхних слоев помещения перемещается непосредственно в рабочую зону вблизи панели. В результате температура в сечении $X=1$ м при $Y=2$ м достигает уже 18,9 °C (рис. 13, а), что выше основного рассматриваемого в эксперименте варианта (рис. 12, а) на 7,1 °C.

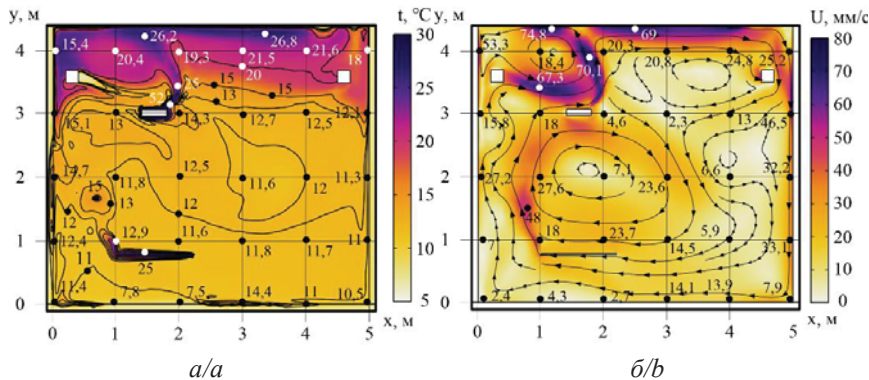


Рис. 12. Поле температур (а) и линии тока (б) для области с панелью (координаты $X_{Tb}=1600$ мм и $Y_{Tb}=755$ мм) в режиме смешанной конвекции при расходе воздуха $2 \cdot 10^{-4}$ кг/(с·м³)

Fig. 12. Temperature field (a) and streamlines (b) for the area with the panel at the height of its location $Y_{Tb}=0.755$ m under mixed convection conditions with air flow rate of $2 \cdot 10^{-4}$ kg/(s·m³)

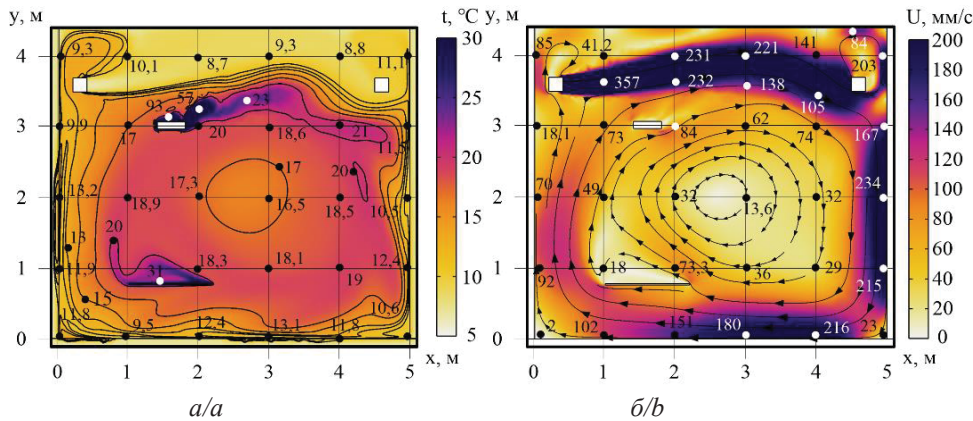


Рис. 13. Поле температур (а) и линии тока (б) для области с панелью (координаты $X_{Tb}=1600$ мм и $Y_{Tb}=755$ мм) в режиме смешанной конвекции при расходе воздуха $11 \cdot 10^{-4}$ кг/(с · м³)

Fig. 13. Temperature field (a) and streamlines (b) for the area with the panel at the height of its location $Y_{Tb}=0.755$ m under mixed convection conditions with air flow rate of $11 \cdot 10^{-4}$ kg/(s · m³)

При расходе $11 \cdot 10^{-4}$ кг/(с · м³), что соответствует $Ri \approx 7,5$, влияние вынужденной конвекции становится преобладающим (рис. 13). Поток относительно холодного воздуха внешней среды формирует развитое циркуляционное течение (рис. 13, б) и понижает общую температуру воздуха, во многом подавляя термогравитационную конвекцию от слабопрогревающихся стен и пола, но увеличивает среднюю температуру в локальной рабочей зоне (рис. 13, а). В этом случае температура над поверхностью оборудования увеличивается до 31 °С. В рабочей зоне (20 см) слева и справа от панели значения температур также увеличиваются (рис. 13, а), что способствует формированию более комфортных условий работы (микроклимата).

Дальнейшее увеличение расхода воздуха ($22 \cdot 10^{-4}$, $33 \cdot 10^{-4}$ кг/(с · м³)) не приводит к масштабным изменениям циркуляционных течений в исследуемой области (рис. 14, 15).

Движение в режиме смешанной конвекции воздушных масс, которое главным образом является причиной формирования температурного поля в локальной рабочей области, характеризуется восходящими потоками нагретого воздуха от поверхностей, на которые приходится основная доля лучистых потоков теплоты, и нисходящими потоками менее нагретого воздуха. Кроме того, на эти потоки влияет приток относительно холодного воздуха, который движется по инерции вправо, но под действием гравитации (имея более низкую температуру) и вниз. Этот поток существенно изменяет рециркуляционное движение в области между ГИИ и горизонтальной панелью.

Влияние интенсивности притока воздуха на распределения температуры поверхности горизонтальной панели и температуры воздуха по высоте на оси симметрии ГИИ иллюстрирует рис. 14.

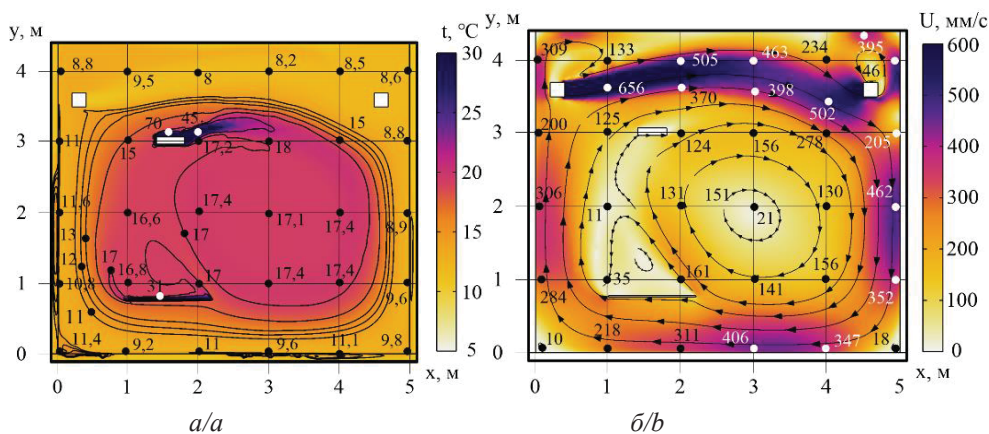


Рис. 14. Поле температур (а) и линии тока (б) для области с панелью (координаты $X_{Tb}=1600$ мм и $Y_{Tb}=755$ мм) в режиме смешанной конвекции при расходе воздуха $22 \cdot 10^{-4}$ кг/(с · м³)

Fig. 14. Temperature field (a) and streamlines (b) for the area with the panel at the height of its location $Y_{Tb}=0.755$ m under mixed convection condition with air flow rate of $22 \cdot 10^{-4}$ kg/(s · m³)

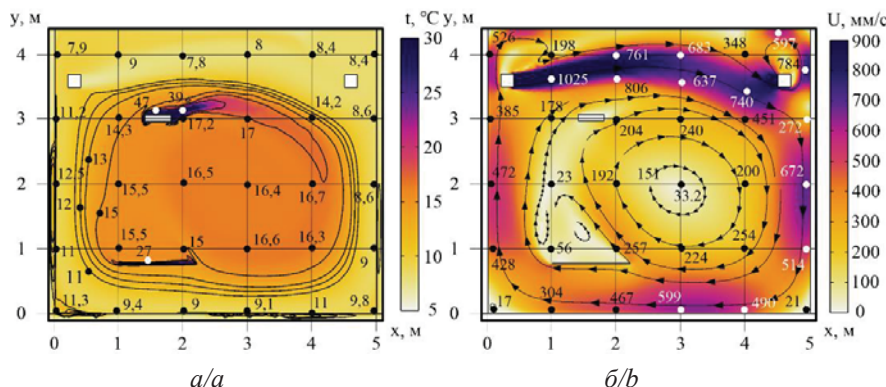


Рис. 15. Поле температур (а) и линии тока (б) для области с панелью (координаты $X_{Tb}=1600$ мм и $Y_{Tb}=755$ мм) в режиме смешанной конвекции при расходе воздуха $33 \cdot 10^{-4}$ кг/(с · м³)

Fig. 15. Temperature field (a) and streamlines (b) for the area with the panel at the height of its location $Y_{Tb}=0.755$ m under mixed convection condition with air flow rate of $33 \cdot 10^{-4}$ kg/(s · m³)

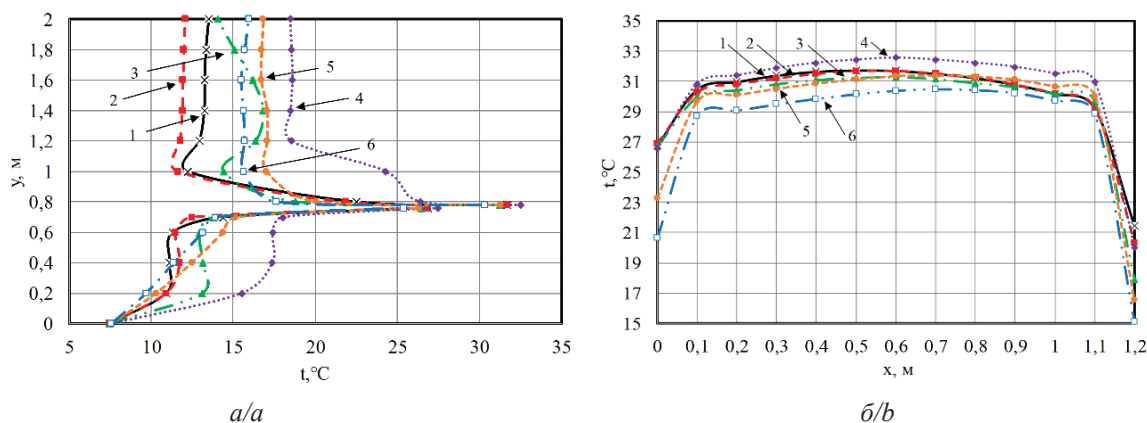


Рис. 16. Распределение температур по координате Y на оси симметрии ГИИ (а) и поверхности панели (б) при $Y_{Tb}=755$ мм в режиме естественной (1) и смешанной конвекции при различных расходах воздуха, кг/(с · м³): 2) $1 \cdot 10^{-4}$, 3) $6 \cdot 10^{-4}$, 4) $11 \cdot 10^{-4}$, 5) $22 \cdot 10^{-4}$, 6) $33 \cdot 10^{-4}$

Fig. 16. Temperature distribution along the Y coordinate on the GIH symmetry axis (a) and the panel surface (b) at $Y_{Tb}=0.755$ m under natural (1) and mixed convection conditions at various air flow rates, kg/(s · m³): 2) $1 \cdot 10^{-4}$, 3) $6 \cdot 10^{-4}$, 4) $11 \cdot 10^{-4}$, 5) $22 \cdot 10^{-4}$, 6) $33 \cdot 10^{-4}$

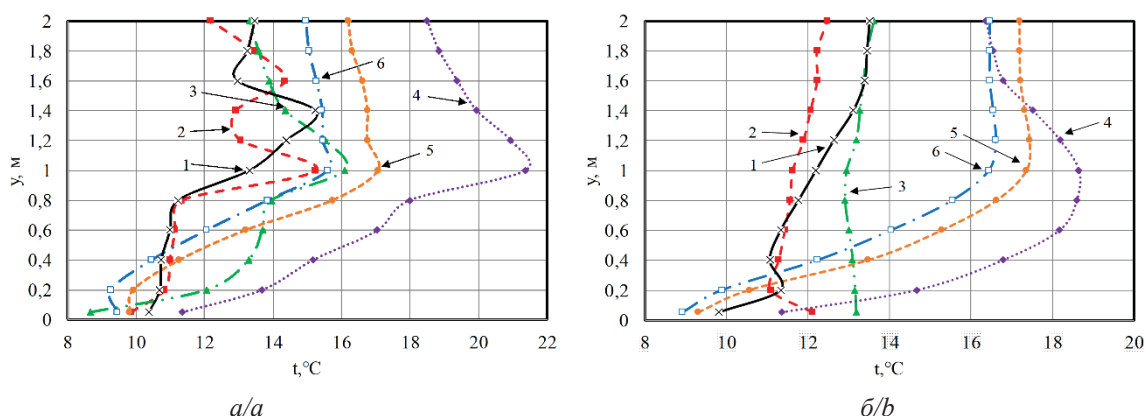


Рис. 17. Распределения температур по координате Y на расстояниях 200 мм от панели слева (а) и справа (б) при $Y_{Tb}=755$ мм в режиме естественной (1) и смешанной конвекции при различных расходах воздуха, кг/(с · м³): 2) $1 \cdot 10^{-4}$, 3) $6 \cdot 10^{-4}$, 4) $11 \cdot 10^{-4}$, 5) $22 \cdot 10^{-4}$, 6) $33 \cdot 10^{-4}$

Fig. 17. Temperature distributions along the Y coordinate at distances of 0.2 m from the panel on the left (a) and right (b) at $Y_{Tb}=0.755$ m under natural (1) and mixed convection conditions at various air flow rates, kg/(s · m³): 2) $1 \cdot 10^{-4}$, 3) $6 \cdot 10^{-4}$, 4) $11 \cdot 10^{-4}$, 5) $22 \cdot 10^{-4}$, 6) $33 \cdot 10^{-4}$

Изменение режима конвекции оказывает влияние и на теплообмен с горизонтальной панелью, что сопровождается, соответственно, изменением распределения температур над ее поверхностью (рис. 16, б). Анализ результатов, представленных на рис. 14, дает основание для вывода, что до расхода воздуха через приточную вентиляцию в $2 \cdot 10^{-4}$ кг/(с·м³) охлаждение поверхности панели осуществляется в основном за счет термогравитационной конвекции, которая формирует распределение температур.

При расходах воздуха до $6 \cdot 10^{-4}$ кг/(с·м³) из системы воздухообмена перепад температуры воздуха по высоте локальной зоны составляет не более 3 °С (рис. 17). При увеличении расхода циркуляционного воздуха перепад температур по высоте ха-

рактеризуется значительным максимумом при $Y=1$ м, что связано с притоком нагретых масс воздуха в эту область (рис. 13–15), перепад температуры по высоте увеличивается до 11 °С. В результате поступления нагретого воздуха в локальную зону вблизи панели увеличивается средняя температура воздуха в ней (рис. 18). Скорость движения воздушных масс в локальных областях также увеличивается с ростом расхода воздуха из системы воздухообмена (рис. 19).

Анализ результатов, представленных на рис. 20, а, позволяет сделать вывод о закономерностях изменения средней температуры воздуха в локальных рабочих зонах слева и справа от горизонтальной панели в зависимости от расхода воздуха в системе воздухообмена.

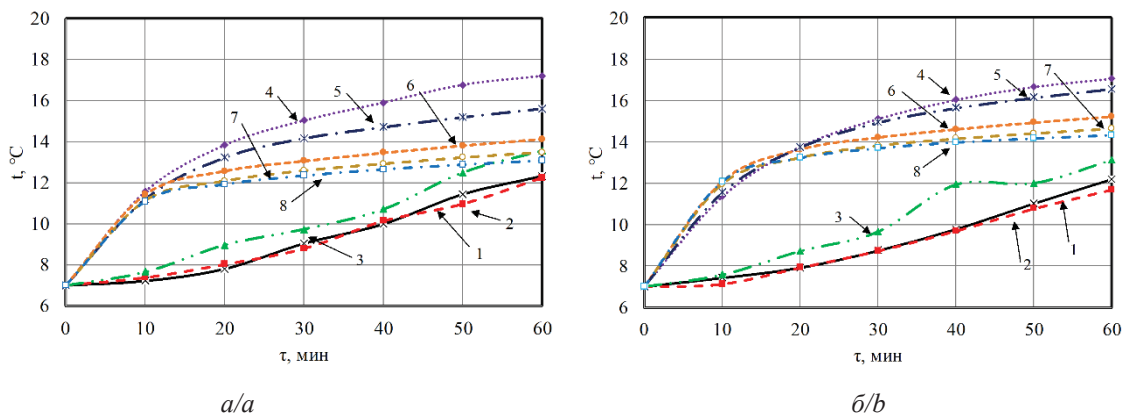


Рис. 18. Изменение средней температуры воздуха в локальных зонах ($0 < Y < 2$ м) на расстоянии 40 см от панели слева (а) и справа (б) во времени при различных расходах воздуха, кг/(с·м³): 1) 0; 2) $1 \cdot 10^{-4}$, 3) $6 \cdot 10^{-4}$, 4) $11 \cdot 10^{-4}$, 5) $17 \cdot 10^{-4}$, 6) $22 \cdot 10^{-4}$, 7) $27 \cdot 10^{-4}$, 8) $33 \cdot 10^{-4}$

Fig. 18. Average air temperature in local working air change ($0 < Y < 2$ m) at a distance of 0.4 m from the panel on the left (a) and right (b) in time at different air flow rates, kg/(s·m³): 1) 0; 2) $1 \cdot 10^{-4}$, 3) $6 \cdot 10^{-4}$, 4) $11 \cdot 10^{-4}$, 5) $17 \cdot 10^{-4}$, 6) $22 \cdot 10^{-4}$, 7) $27 \cdot 10^{-4}$, 8) $33 \cdot 10^{-4}$

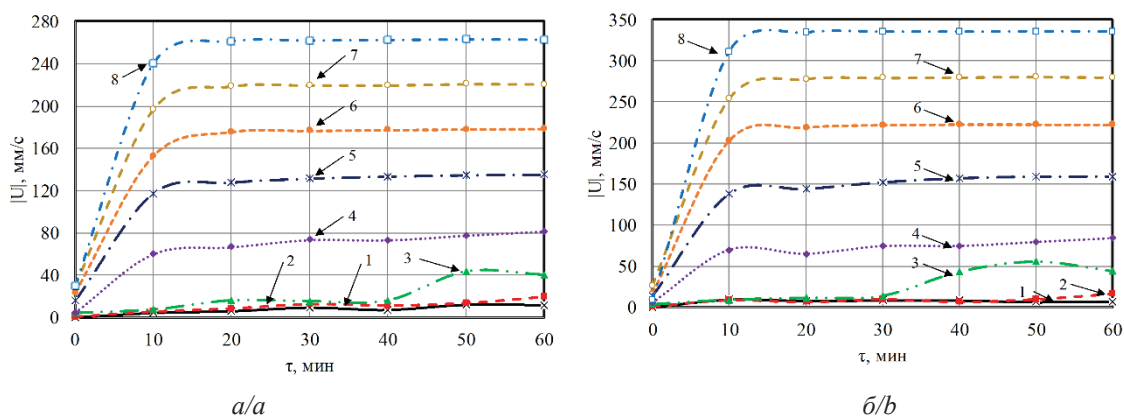


Рис. 19. Изменение средней скорости воздуха в локальных зонах ($0 < Y < 2$ м) на расстоянии 40 см от панели слева (а) и справа (б) во времени, при различных расходах воздуха, кг/(с·м³): 1) 0; 2) $1 \cdot 10^{-4}$, 3) $6 \cdot 10^{-4}$, 4) $11 \cdot 10^{-4}$, 5) $17 \cdot 10^{-4}$, 6) $22 \cdot 10^{-4}$, 7) $27 \cdot 10^{-4}$, 8) $33 \cdot 10^{-4}$

Fig. 19. Average air velocity in local working air change ($0 < Y < 2$ m) at a distance of 0.4 m from the panel on the left (a) and right (b) in time at different air flow rates, kg/(s·m³): 1) 0; 2) $1 \cdot 10^{-4}$, 3) $6 \cdot 10^{-4}$, 4) $11 \cdot 10^{-4}$, 5) $17 \cdot 10^{-4}$, 6) $22 \cdot 10^{-4}$, 7) $27 \cdot 10^{-4}$, 8) $33 \cdot 10^{-4}$

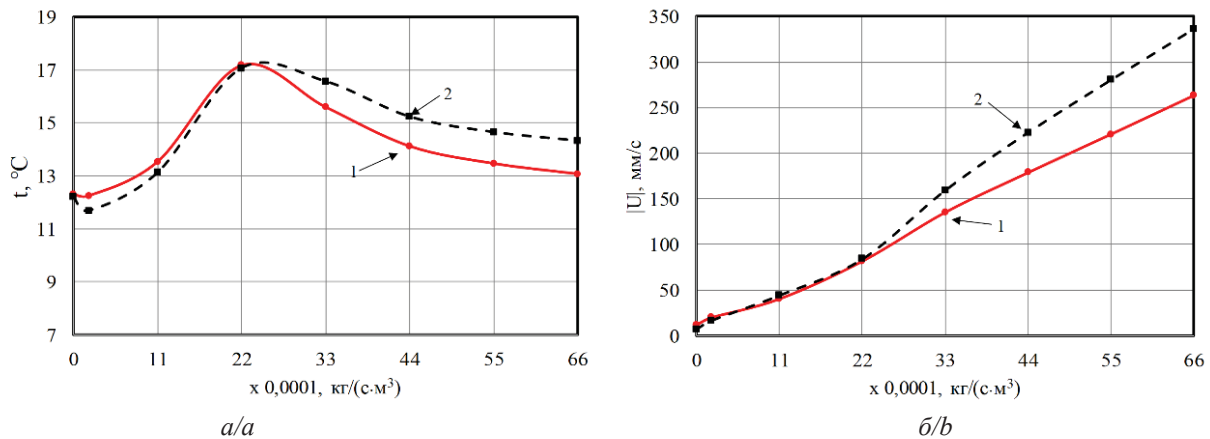


Рис. 20. Зависимость средней температуры (а) и скорости (б) воздуха в локальных зонах ($0 < Y < 2$ м) на расстоянии 40 см от панели слева (1) и справа (2) в момент времени 60 мин от расхода воздуха

Fig. 20. Dependence of the average temperature (a) and velocity (b) of air on the air flow in local working area ($0 < Y < 2$ m) at a distance of 0.4 m from the panel on the left (1) and right (2) at a time of 60 min

При повышении расхода воздуха системы воздухообмена увеличивается средняя температура воздуха в локальных рабочих зонах слева и справа от панели. Это связано с тем, что средняя скорость воздуха в исследуемой области увеличивается (рис. 20, б), интенсифицируются циркуляционные течения и нагретый ГИИ в верхней части помещения воздух перемещается вниз, перемешиваясь при этом с менее нагретым, перепад температуры по высоте уменьшается, а средняя температура воздуха в локальной рабочей зоне увеличивается (рис. 20, а). При расходе воздуха через систему вентиляции около $22 \cdot 10^{-4}$ кг/(с·м³) устанавливается максимально достижимая средняя температура в локальной рабочей зоне (рис. 20, а). В этом случае воздух, нагретый от ГИИ за счет его уноса основным холодным потоком воздуха, выходящего из приточного канала воздухообменной системы, находящийся в верхней части помещения, перемещается непосредственно в рассматриваемую локальную зону (рис. 14). Дальнейшее повышение расхода в системе воздухообмена приводит (рис. 20, а) к уменьшению температуры воздуха в помещении вследствие увеличения притока масс холодного (наружного) воздуха из системы воздухообмена.

Стоит отметить, что скорости движения воздушных масс в области расположения работающего находятся в пределах, установленных EN-16798. На основании анализа результатов (рис. 20) можно сделать обоснованный вывод о возможности влияния на микроклимат локальных рабочих зон путем регулирования расхода системы воздухообмена.

Заключение

По результатам экспериментального и теоретического изучения процессов переноса тепла в локальных рабочих зонах помещения при совместной

работе газового инфракрасного излучателя и системы воздухообмена установлено, что режим конвективного теплообмена (естественный, смешанный), возникающего в помещении, оказывает существенное влияние на структуру течений и температурный режим воздушных масс в помещении. Работа системы воздухообмена с расположением в верхней части исследуемой области зон ввода и вывода воздушных масс увеличивает скорость воздуха в помещении, интенсифицируя процесс перемешивания нагретого и холодного воздуха, при этом уменьшая перепад его температуры по высоте помещения.

Приток в зону влияния газового инфракрасного излучателя холодного воздуха при малых и умеренных (до $2 \cdot 10^{-4}$ кг/с·м³) расходах последнего изменяет характер течения воздуха в локальной рабочей зоне. Например, при скорости воздуха 0,08 м/с средняя температура воздуха повышается на 5 градусов (с 12 до 17 °C) в зоне влияния газового инфракрасного излучателя. При определенном расходе воздуха ($22 \cdot 10^{-4}$ кг/с·м³) системы воздухообмена возможно установление максимально достижимой средней температуры воздуха (17 °C) в локальных зонах, в которых может находиться работающий. Такой режим работы системы воздухообмена повышает энергоэффективность использования систем газового инфракрасного излучения в крупногабаритных помещениях для обеспечения регламентного температурного режима в локальной рабочей зоне.

Полученные данные о распределении температур и скоростей воздуха дают возможность оценки влияния интенсивности смешанной конвекции на эффективность функционирования ГИИ при обеспечении нормативных условий микроклимата в рабочей зоне.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. A novel spatial based approach for estimation of space heating demand saving potential and CO₂ emissions reduction in urban areas / D. Meha, B. Dragusha, J. Thakur, T. Novosel, N. Duić // *Energy*. – 2021. – Vol. 225. DOI: 10.1016/j.energy.2021.120251.
2. Heat roadmap Europe: combining district heating with heat savings to decarbonise the EU energy system / D. Connolly, H. Lund, B.V. Mathiesen, S. Werner, B. Möller, U. Persson, T. Boermans, D. Trier, P.A. Østergaard, S. Nielsen // *Energy Policy*. – 2014. – Vol. 65. – P. 475–489. DOI: 10.1016/j.enpol.2013.10.035.
3. Energy saving potential for space heating in Chinese airport terminals: The impact of air infiltration / X. Liu, T. Zhang, X. Liu, L. Li, L. Lin, Y. Jiang // *Energy*. – 2021. – Vol. 215. DOI: 10.1016/j.energy.2020.119175.
4. Energy-saving solution in the heating system of buildings / N. Kobelev, S. Emelyanov, V. Kretova, A. Morzhavin, V. Amelin, V. Kobelev // *Procedia Engineering*. – 2015. – Vol. 117. – P. 186–190. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.08.139.
5. Shen P., Wang Z., Ji Y. Exploring potential for residential energy saving in New York using developed lightweight prototypical building models based on survey data in the past decades // *Sustainable Cities and Society*. – 2021. – Vol. 66. DOI: 10.1016/j.scs.2020.102659.
6. Nielsen S., Möller B. GIS based analysis of future district heating potential in Denmark // *Energy*. – 2013. – Vol. 57. – P. 458–468. DOI: 10.1016/j.energy.2013.05.041.
7. ASHRAE, Standard 55-2017. Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. – Atlanta, USA, ASHRAE, 2017. – 60 p.
8. ISO 7730. Moderate thermal environment – determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort. – Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization, 2005. – 50 p.
9. De Dear R.J., Brager G.S. Thermal comfort in naturally ventilated buildings: revisions to ASHRAE Standard 55 // *Energy and Buildings*. – 2002. – Vol. 34. – P. 549–561. DOI: 10.1016/S0378-7788(02)00005-1.
10. Olesen B.W., Parsons K.C. Introduction to thermal comfort standards and to the proposed new version of EN ISO 7730 // *Energy and Buildings*. – 2002. – Vol. 34. – P. 537–548. DOI: 10.1016/S0378-7788(02)00004-X.
11. Advances in the research of building energy saving / C.Z. Li, L. Zhang, X. Liang, B. Xiao, V.W.Y. Tam, X. Lai, Z. Chen // *Energy and Buildings*. – 2022. – Vol. 254. DOI: 10.1016/j.enbuild.2021.111556.
12. A simplified analytical model to evaluate the impact of radiant heat on building cooling load / C. Yan, S. Wang, K. Shan, Y. Lu // *Applied Thermal Engineering*. – 2015. – Vol. 77. – P. 30–41. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2014.12.017.
13. Experimental study on the thermal performance of an enhanced-convection overhead radiant floor heating system / D. Wang, C. Wu, Y. Liu, P. Chen, J. Liu // *Energy Build.* – 2017. – Vol. 135. – P. 233–243. DOI: 10.1016/j.enbuild.2016.11.017.
14. Experimental investigation of cooling performance of a novel HVAC system combining natural ventilation with diffuse ceiling inlet and TABS / T. Yu, P. Heiselberg, B. Lei, M. Pomianowski, C. Zhang, R. Jensen // *Energy and Buildings*. – 2015. – Vol. 105. – P. 165–177. DOI: 10.1016/j.enbuild.2015.07.039.
15. Thermal comfort and energy performance of personal comfort systems (PCS): a systematic review and meta-analysis / W. Song, Z. Zhang, Z. Chen, F. Wang, B. Yang // *Energy and Buildings*. – 2022. – Vol. 256. DOI: 10.1016/j.enbuild.2021.111747.
16. Evaluation and comparison of thermal comfort of convective and radiant heating terminals in office buildings / B. Lin, Z. Wang, H. Sun, Y. Zhu, Q. Ouyang // *Building and Environment*. – 2016. – Vol. 106. – P. 91–102. DOI: 10.1016/j.buildenv.2016.06.015.
17. Karmann C., Schiavon S., Bauman F. Thermal comfort in buildings using radiant vs. all-air systems: A critical literature review // *Building and Environment*. – 2017. – Vol. 111. – P. 123–131. DOI: 10.1016/j.buildenv.2016.10.020.
18. Fallah M., Medghalchi Z. Proposal of a new approach for avoiding Anti-Insulation in residential buildings by considering occupant's comfort condition // *Thermal Science and Engineering Progress*. – 2020. – Vol. 20. DOI: 10.1016/j.tsep.2020.100721.
19. Thermal performance investigation of a novel heating terminal integrated with flat heat pipe and heat transfer enhancement / H. Sun, M. Duan, Y. Wu, B. Lin, Z. Yang, H. Zhao // *Energy*. – 2021. – Vol. 236. DOI: 10.1016/j.energy.2021.121411.
20. A comparative study on the applicability of six radiant floor, wall, and ceiling heating systems based on thermal performance analysis / J. Oravec, O. Šikula, M. Krajčík, M. Arıcı, M. Mohapl // *Journal of Building Engineering*. – 2021. – Vol. 36. DOI: 10.1016/j.jobe.2020.102133.
21. Numerical investigation of the energy efficiency of a serial pipe-embedded external wall system considering water temperature changes in the pipeline / S. Jiang, X. Li, W. Lyu, B. Wang, W. Shi // *Journal of Building Engineering*. – 2020. – Vol. 31. DOI: 10.1016/j.jobe.2020.101435.
22. A review of integrated radiant heating/cooling with ventilation systems - Thermal comfort and indoor air quality / C. Zhang, M. Pomianowski, P.K. Heiselberg, T. Yu // *Energy and Buildings*. – 2020. – Vol. 223. DOI: 10.1016/j.enbuild.2020.110094.
23. Field study and numerical investigation on heating performance of air carrying energy radiant air-conditioning system in an office / P. Peng, G. Gong, X. Deng, C. Liang, W. Li // *Energy and Buildings*. – 2020. – Vol. 209. DOI: 10.1016/j.enbuild.2019.109712.
24. Vösa K.-V., Ferrantelli A., Kurnitskia J. A combined analytical model for increasing the accuracy of heat emission predictions in rooms heated by radiators // *Journal of Building Engineering*. – 2019. – Vol. 23. – P. 291–300. DOI: 10.1016/j.jobe.2019.02.009.
25. Thermal analysis of a water source heat pump for space heating using an outdoor pool as a heat source / J.M. Cardemil, W. Schneider, M. Behzad, A.R. Starke // *Journal of Building Engineering*. – 2019. – Vol. 3. DOI: 10.1016/j.jobe.2020.101581.
26. Gourlis G., Kovacic I. Building Information Modelling for analysis of energy efficient industrial buildings – a case study // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2017. – Vol. 68. – P. 953–963. DOI: 10.1016/j.rser.2016.02.009.
27. A temperature and time-sharing dynamic control approach for space heating of buildings in district heating system / G. Liu, X. Zhou, J. Yan, G. Yan // *Energy*. – 2021. – Vol. 221. DOI: 10.1016/j.energy.2021.119835.
28. Moutinho V., Moreira A.C., Silva P.M. The driving forces of change in energy-related CO₂ emissions in Eastern, Western, Northern and Southern Europe: the LMDI approach to decomposition analysis // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2015. – Vol. 50. – P. 1485–1499. DOI: 10.1016/j.rser.2015.05.072.

29. Yang L., Yan H., Lam J.C. Thermal comfort and building energy consumption implications – a review // *Applied Energy*. – 2014. – Vol. 115. – P. 164–173. DOI: 10.1016/j.apenergy.2013.10.062.
30. Kurilenko N.I., Kurilenko E.Yu., Mamontov G.Ya. New approach to microclimate parameter selection for the production area with heat supply systems based on gas infrared radiators // *EPJ Web of Conferences*. – 2016. – Vol. 110. DOI: 10.1051/epjconf/201611001033.
31. Experimental and numerical study of heat transfer in production area heated by gas infrared source / G.V. Kuznetsov, N.I. Kurilenko, V.I. Maksimov, T.A. Nagornova // *International Journal of Thermal Sciences*. – 2020. – Vol. 154. DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2020.106396.
32. Kuznetsov G.V., Maksimov V.I., Nagornova T.A. Prognostic potential of free convection models for analysis of thermal conditions of heat supply objects // *Thermal Science*. – 2018. – Vol. 22. – P. 545–556. DOI: 10.2298/TSCI150625104K.
33. Wang H., Xu M., Bian C. Experimental comparison of local direct heating to improve thermal comfort of workers // *Building and Environment*. – 2020. – Vol. 177. DOI: 10.1016/j.buildenv.2020.106884.
34. Rhee K.-N., Kim K.W. A 50 year review of basic and applied research in radiant heating and cooling systems for the built environment // *Building and Environment*. – 2015. – Vol. 91. – P. 166–190. DOI: 10.1016/j.buildenv.2015.03.040.
35. Lee E.H. A review on applications of infrared heating for food processing in comparison to other industries // *Innovative Food Processing Technologies*. – 2021. – P. 431–455. DOI: 10.1016/B978-0-08-100596-5.22670-X.
36. A nano-photonic filter for near infrared radiative heater / H. Wang, S. Kaur, M. Elzouka., R. Prasher // *Applied Thermal Engineering*. – 2019. – Vol. 153. – P. 221–224. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2019.03.001.
37. Development of a new infrared heater based on an annular cylindrical radiant burner for direct heating applications / A. Maznoy, A. Kirdyashkin, N. Pichugin, S. Zambalov, D. Petrov // *Energy*. – 2020. – Vol. 204. DOI: 10.1016/j.energy.2020.117965.
38. Анализ преимуществ систем обеспечения теплового режима локальных рабочих зон на основе газовых инфракрасных излучателей по сравнению с традиционными конвективными системами отопления / В.И. Максимов, Т.А. Нагорнова, Н.И. Куриленко, И.В. Волошко // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2021. – Т. 332. – № 9. – С. 128–141. DOI: 10.18799/24131830/2021/9/3363
39. Dudkiewicz E., Szałański P. Overview of exhaust gas heat recovery technologies for radiant heating systems in large halls // *Thermal Science and Engineering Progress*. – 2020. – Vol. 18. DOI: 10.1016/j.tsep.2020.100522.
40. Kurilenko N.I., Mamontov G.Ya., Mikhaylova L.Yu. Temperature patterns in the gas infrared radiator heating area // *EPJ Web of Conferences*. – 2015. – Vol. 82. DOI: 10.1051/epjconf/20158201006.
41. Experimental determination of the worker's clothing surface temperature during the ceramic gas heater operation / G.V. Kuznetsov, V.I. Maksimov, T.A. Nagornova, I.V. Voloshko, N.Y. Gutareva, N.I. Kurilenko // *Thermal Science and Engineering Progress*. – 2021. – Vol. 22. DOI: 10.1016/j.tsep.2021.100851.
42. Hesarakı A., Huda N. A comparative review on the application of radiant low-temperature heating and high-temperature cooling for energy, thermal comfort, indoor air quality, design and control // *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. – 2022. – Vol. 49. DOI: 10.1016/j.seta.2021.101661.
43. Analysis of the influence of the gas infrared heater and equipment element relative positions on industrial premises thermal conditions / B.V. Borisov, A.V. Vyatkin, G.V. Kuznetsov, V.I. Maksimov, T.A. Nagornova // *Energies*. – 2022. – Vol. 15. DOI: 10.3390/en15228749.
44. Mathematical modeling of heat transfer in a room with a gas infrared emitter, an air exchange system, and a local fence of the working area / B.V. Borisov, A.V. Vyatkin, G.V. Kuznetsov, V.I. Maksimov, T.A. Nagornova // *Journal of Applied and Industrial Mathematics*. – 2023. – Vol. 17. – P. 15–24. DOI: 10.1134/S1990478923010027

Информация об авторах

Борис Владимирович Борисов, доктор физико-математических наук, профессор НОЦ И.Н. Бутакова Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. bvborisov@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1172-1431>

Александр Витальевич Вяткин, аспирант НОЦ И.Н. Бутакова Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. avv47@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2238-7974>

Гений Владимирович Кузнецов, доктор физико-математических наук, профессор НОЦ И.Н. Бутакова Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. kuznetsovgv@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8244-2894>

Вячеслав Иванович Максимов, кандидат технических наук, доцент НОЦ И.Н. Бутакова Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. elf@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0908-8358>

Татьяна Александровна Нагорнова, кандидат технических наук, доцент НОЦ И.Н. Бутакова Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. tania@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1863-4872>

Поступила в редакцию: 02.12.2024

Поступила после рецензирования: 06.12.2024

Принята к публикации: 24.12.2024

REFERENCES

1. Meha D., Dragusha B., Thakur J., Novosel T., Duić N. A novel spatial based approach for estimation of space heating demand saving potential and CO₂ emissions reduction in urban areas. *Energy*, 2021, vol. 225. DOI: 10.1016/j.energy.2021.120251.
2. Connolly D. Heat roadmap Europe: combining district heating with heat savings to decarbonise the EU energy system. *Energy Policy*, 2014, vol. 65, pp. 475–489. DOI: 10.1016/j.enpol.2013.10.035.
3. Liu X., Zhang T., Liu X., Li L., Lin L., Jiang Y. Energy saving potential for space heating in Chinese airport terminals: the impact of air infiltration. *Energy*, 2021, vol. 215. DOI: 10.1016/j.energy.2020.119175.
4. Kobelev N., Emelyanov S., Kretova V., Morzhavin A., Amelin V., Kobelev V. Energy-saving solution in the heating system of buildings. *Procedia Engineering*, 2015, vol. 117, pp. 186–190. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.08.139.
5. Shen P., Wang Z., Ji Y. Exploring potential for residential energy saving in New York using developed lightweight prototypical building models based on survey data in the past decades. *Sustainable Cities and Society*, 2021, vol. 66. DOI: 10.1016/j.scs.2020.102659.
6. Nielsen S., Möller B. GIS based analysis of future district heating potential in Denmark. *Energy*, 2013, vol. 57, pp. 458–468. DOI: 10.1016/j.energy.2013.05.041.
7. ASHRAE, Standard 55-2017. *Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*. Atlanta, USA, ASHRAE, 2017. 60 p.
8. ISO 7730, *Moderate thermal environment – determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort*. Geneva, Switzerland, International Organization for Standardization, 2005. 50 p.
9. De Dear R.J., Brager G.S. Thermal comfort in naturally ventilated buildings: revisions to ASHRAE Standard 55. *Energy and Buildings*, 2002, vol. 34, pp. 549–561. DOI: 10.1016/S0378-7788(02)00005-1.
10. Olesen B.W., Parsons K.C. Introduction to thermal comfort standards and to the proposed new version of EN ISO 7730. *Energy and Buildings*, 2002, vol. 34, pp. 537–548. DOI: 10.1016/S0378-7788(02)00004-X.
11. Li C.Z. Advances in the research of building energy saving. *Energy and Buildings*, 2022, vol. 254. DOI: 10.1016/j.enbuild.2021.111556.
12. Yan C., Wang S., Shan K., Lu Y. A simplified analytical model to evaluate the impact of radiant heat on building cooling load. *Applied Thermal Engineering*, 2015, vol. 77, pp. 30–41. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2014.12.017.
13. Wang D. Experimental study on the thermal performance of an enhanced-convection overhead radiant floor heating system. *Energy Build.*, 2017, vol. 135, pp. 233–243. DOI: 10.1016/j.enbuild.2016.11.017.
14. Yu T. Experimental investigation of cooling performance of a novel HVAC system combining natural ventilation with diffuse ceiling inlet and TABS. *Energy and Buildings*, 2015, vol. 105, pp. 165–177. DOI: 10.1016/j.enbuild.2015.07.039.
15. Song W. Thermal comfort and energy performance of personal comfort systems (PCS): a systematic review and meta-analysis. *Energy and Buildings*, 2022, vol. 256. DOI: 10.1016/j.enbuild.2021.111747.
16. Lin B. Evaluation and comparison of thermal comfort of convective and radiant heating terminals in office buildings. *Building and Environment*, 2016, vol. 106, pp. 91–102. DOI: 10.1016/j.buildenv.2016.06.015.
17. Karmann C., Schiavon S., Bauman F. Thermal comfort in buildings using radiant vs. all-air systems: a critical literature review. *Building and Environment*, 2017, vol. 111, pp. 123–131. DOI: 10.1016/j.buildenv.2016.10.020.
18. Fallah M., Medghalchi Z. Proposal of a new approach for avoiding Anti-Insulation in residential buildings by considering occupant's comfort condition. *Thermal Science and Engineering Progress*, 2020, vol. 20. DOI: 10.1016/j.tsep.2020.100721.
19. Sun H. Thermal performance investigation of a novel heating terminal integrated with flat heat pipe and heat transfer enhancement. *Energy*, 2021, vol. 236. DOI: 10.1016/j.energy.2021.121411.
20. Oravec J. A comparative study on the applicability of six radiant floor, wall, and ceiling heating systems based on thermal performance analysis. *Journal of Building Engineering*, 2021, vol. 36. DOI: 10.1016/j.jobeb.2020.102133.
21. Jiang S. Numerical investigation of the energy efficiency of a serial pipe-embedded external wall system considering water temperature changes in the pipeline. *Journal of Building Engineering*, 2020, vol. 31. DOI: 10.1016/j.jobeb.2020.101435.
22. Zhang C. A review of integrated radiant heating/cooling with ventilation systems – thermal comfort and indoor air quality. *Energy and Buildings*, 2020, vol. 223. DOI: 10.1016/j.enbuild.2020.110094.
23. Peng P. Field study and numerical investigation on heating performance of air carrying energy radiant air-conditioning system in an office. *Energy and Buildings*, 2020, vol. 209. DOI: 10.1016/j.enbuild.2019.109712.
24. Vösa K., Ferrantelli A., Kurnitskaja J. A combined analytical model for increasing the accuracy of heat emission predictions in rooms heated by radiators. *Journal of Building Engineering*, 2019, vol. 23, pp. 291–300. DOI: 10.1016/j.jobeb.2019.02.009.
25. Cardemil J.M. Thermal analysis of a water source heat pump for space heating using an outdoor pool as a heat source. *Journal of Building Engineering*, 2019, vol. 3. DOI: 10.1016/j.jobeb.2020.101581.
26. Gourlis G., Kovacic I. Building Information Modelling for analysis of energy efficient industrial buildings – a case study. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, vol. 68, pp. 953–963. DOI: 10.1016/j.rser.2016.02.009.
27. Liu G. A temperature and time-sharing dynamic control approach for space heating of buildings in district heating system. *Energy*, 2021, vol. 221. DOI: 10.1016/j.energy.2021.119835.
28. Moutinho V. The driving forces of change in energy-related CO₂ emissions in Eastern, Western, Northern and Southern Europe: the LMDI approach to decomposition analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, vol. 50, pp. 1485–1499. DOI: 10.1016/j.rser.2015.05.072.
29. Yang L., Yan H., Lam J.C. Thermal comfort and building energy consumption implications – a review, *Applied Energy*, 2014, vol. 115, pp. 164–173. DOI: 10.1016/j.apenergy.2013.10.062.
30. Kurilenko N.I. New approach to microclimate parameter selection for the production area with heat supply systems based on gas infrared radiators. *EPJ Web of Conferences*, 2016, vol. 110. DOI: 10.1051/epjconf/201611001033.
31. Kuznetsov G.V. Experimental and numerical study of heat transfer in production area heated by gas infrared source. *International Journal of Thermal Sciences*, 2020, vol. 154. DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2020.106396.
32. Kuznetsov G.V. Prognostic potential of free convection models for analysis of thermal conditions of heat supply objects. *Thermal Science*, 2018, vol. 22, pp. 545–556. DOI: 10.2298/TSCI150625104K.

33. Wang H. Experimental comparison of local direct heating to improve thermal comfort of workers. *Building and Environment*, 2020, vol. 177. DOI: 10.1016/j.buildenv.2020.106884.
34. Rhee K.-N., Kim K.W. A 50 year review of basic and applied research in radiant heating and cooling systems for the built environment. *Building and Environment*, 2015, vol. 91, pp. 166–190. DOI: 10.1016/j.buildenv.2015.03.040.
35. Lee E.H. A review on applications of infrared heating for food processing in comparison to other industries. *Innovative Food Processing Technologies*, 2021, pp. 431–455. DOI: 10.1016/B978-0-08-100596-5.22670-X.
36. Wang H. A nano-photonic filter for near infrared radiative heater. *Applied Thermal Engineering*, 2019, vol. 153, pp. 221–224. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2019.03.001.
37. Maznoy A. Development of a new infrared heater based on an annular cylindrical radiant burner for direct heating applications. *Energy*, 2020, vol. 204. DOI: 10.1016/j.energy.2020.117965.
38. Maksimov V.I. Advantage analysis of systems for ensuring local working zones thermal conditions based on gas infrared emitters in comparison with traditional convective heating systems. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 9, pp. 128–141. (In Russ.) DOI: 10.18799/24131830/2021/9/3363.
39. Dudkiewicz E., Szałański P. Overview of exhaust gas heat recovery technologies for radiant heating systems in large halls. *Thermal Science and Engineering Progress*, 2020, vol. 18. DOI: 10.1016/j.tsep.2020.100522.
40. Kurilenko N.I. Temperature patterns in the gas infrared radiator heating area. *EPJ Web of Conferences*, 2015, vol. 82. DOI: 10.1051/epjconf/20158201006.
41. Kuznetsov G.V. Experimental determination of the worker's clothing surface temperature during the ceramic gas heater operation. *Thermal Science and Engineering Progress*, 2021, vol. 22. DOI: 10.1016/j.tsep.2021.100851.
42. Hesarakı A., Huda N. A comparative review on the application of radiant low-temperature heating and high-temperature cooling for energy, thermal comfort, indoor air quality, design and control. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2022, vol. 49. DOI: 10.1016/j.seta.2021.101661.
43. Borisov B.V. Analysis of the influence of the gas infrared heater and equipment element relative positions on industrial premises thermal conditions. *Energies*, 2022, vol. 15. DOI: 10.3390/en15228749.
44. Borisov B.V. Mathematical modeling of heat transfer in a room with a gas infrared emitter, an air exchange system, and a local fence of the working area. *Journal of Applied and Industrial Mathematics*, 2023, vol. 17, pp. 15–24.

Information about the authors

Boris V. Borisov, Dr. Sc., Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. bvborisov@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1172-1431>

Alexander V. Vyatkin, Postgraduate Student, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. avv47@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2238-7974>

Geniy. V. Kuznetsov, Dr. Sc., Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. kuznetsovgv@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8244-2894>

Vyacheslav I. Maksimov, Cand. Sc., Associate Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. elf@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0908-8358>

Tatiana A. Nagornova, Cand. Sc., Associate Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. tania@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1863-4872>

Received: 02.12.2024

Revised: 06.12.2024

Accepted: 24.12.2024

УДК 622.276

DOI: 10.18799/24131830/2025/2/4609

Шифр специальности ВАК: 2.8.4

Исследование возможности автоматической настройки кривых относительных фазовых проницаемостей для задач адаптации геолого-гидродинамической модели

Д.А. Бельтюков¹, А.А. Кочнев^{1✉}, Лей Ван², С.В. Галкин¹

¹ Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Россия, г. Пермь

² Китайский нефтяной университет, Циндао, Китайская Народная Республика

✉ sashakoch93@gmail.com

Аннотация. Актуальность. Геолого-гидродинамическое моделирование является неотъемлемой частью проектирования разработки месторождений. Процесс адаптации геолого-гидродинамической модели к историческим показателям разработки является многоитерационным и сопровождается наличием высокой степени неопределенности геологических параметров. От качества адаптации модели напрямую зависит достоверность прогнозных показателей, на основании которых принимаются ключевые проектные решения. Одним из основных макропараметров при адаптации модели является вид кривых относительных фазовых проницаемостей. Оптимизация настройки данного макропараметра позволит существенно сократить затраты ресурсов и времени при адаптации геолого-гидродинамической модели. **Цель.** Разработка подхода автоматической настройки кривых относительных фазовых проницаемостей. **Методы.** Геолого-гидродинамическое моделирование, математическое моделирование, статистические методы. **Результаты и выводы.** Представлен подход автоматической настройки кривых относительных фазовых проницаемостей под динамику разработки залежи. Реализация подхода выполнена в виде машинного кода на языке программирования Python. Первичная апробация проведена на шести залежах с терригенным и карбонатным типом коллектора месторождений Волго-Уральской и Тимано-Печорской нефтегазоносных провинций. Отмечена высокая сходимость фактических кривых относительных фазовых проницаемостей, настроенных в процессе многоитерационной адаптации гидродинамической модели, с расчетными модельными кривыми. На следующем этапе проведена апробация методики на сложнопостроенном карбонатном объекте с высокой вязкостью флюида. Установлено, что в рамках одной итерации удалось с высокой степенью сходимости настроить интегральные параметры добычи нефти и обводненности. Разработанный подход позволяет значительно сократить время настройки кривых относительных фазовых проницаемостей на динамику разработки залежи путем использования разработанного программного модуля.

Ключевые слова: геолого-гидродинамическая модель, относительные фазовые проницаемости, функция Бакли–Лeverетта, адаптация геолого-гидродинамической модели, высоковязкие нефти, карбонатный и терригенный коллектор

Благодарности: Исследование выполнено при поддержке Правительства Пермского края, исследовательский проект № СЭД-26-08-08-30 от 24.01.2024.

Для цитирования: Исследование возможности автоматической настройки кривых относительных фазовых проницаемостей для задач адаптации геолого-гидродинамической модели / Д.А. Бельтюков, А.А. Кочнев, Лей Ван, С.В. Галкин // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 2. – С. 190–200. DOI: 10.18799/24131830/2025/2/4609

UDC 622.276

DOI: 10.18799/24131830/2025/2/4609

Possibility of automatic adjustment of relative phase permeability curves for the tasks of geologic-hydrodynamic model adaptation

D.A. Beltiukov¹, A.A. Kochnev^{1✉}, Lei Wang², S.V. Galkin¹

¹ Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

² China University of Petroleum (Huadong), Qingdao, China

✉ sashakoch93@gmail.com

Abstract. Relevance. Geologic-hydrodynamic modeling is an integral part of field development design. The process of geological and hydrodynamic model adaptation to the development history is multi-iterative and is accompanied by a high degree of uncertainty of geological parameters. The quality of model adaptation directly affects the reliability of forecast indicators, on the basis of which key design decisions are made. One of the main macroparameters in model adaptation is the type of relative phase permeability curves. Optimization of setting this macro-parameter will significantly reduce resource and time costs during geological and hydrodynamic model adaptation. **Aim.** Development of an approach for automatic adjustment of relative phase permeability curves. **Methods.** Geologic-hydrodynamic modeling, mathematical modeling, statistical methods. **Results and conclusions.** The authors have developed the approach of automatic adjustment of relative phase permeability curves to the dynamics of reservoir performance. The approach is implemented as a machine code in the Python programming language. Initial testing was carried out on six deposits with terrigenous and carbonate reservoir type of fields of Volga-Ural and Timan-Pechora oil and gas bearing provinces. High convergence of actual curves of relative phase permeabilities, adjusted in the process of multi-iteration adaptation of hydrodynamic model, with calculated model curves was noted. At the next stage, the method was tested on a complex carbonate object with high fluid viscosity. It was found that within one iteration it was possible to adjust the integral parameters of oil production and water cut with a high degree of convergence. Thus, the developed approach makes it possible to significantly reduce the time of adjustment of relative phase permeability curves for the dynamics of reservoir development by using the program module.

Keywords: geologic-hydrodynamic model, relative phase permeabilities, Buckley–Leverett function, geologic-hydrodynamic model adaptation, high-viscosity oils, carbonate and terrigenous reservoirs

Acknowledgements: The reported study was partially supported by the Government of Perm Krai, research project no. SED-26-08-08-30 from 24.01.2024.

For citation: Beltiukov D.A., Kochnev A.A., Wang Lei, Galkin S.V. Possibility of automatic adjustment of relative phase permeability curves for the tasks of geologic-hydrodynamic model adaptation. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 2, pp. 190–200. DOI: 10.18799/24131830/2025/2/4609

Введение

Современные подходы проектирования разработки опираются на результаты геолого-гидродинамического моделирования. Все без исключения проектные решения основываются на результатах прогнозных расчетов на «цифровом двойнике месторождения». Развитие сферы цифровых технологий позволяет обрабатывать и комплексовать большой объем разномасштабной информации в геолого-гидродинамической модели. Задачей модели является воспроизведение фильтрационных потоков флюида в процессе разработки залежи, диагностика состояния разработки и распределения запасов, прогноз технологических показателей с выбором оптимальных проектных решений [1–3]. Модель позволяет отразить геологические особенности строения объекта.

Геолого-гидродинамические модели (ГДМ) используются для обоснования эффективности проведения геолого-технических мероприятий, направленных на интенсификацию добычи и использования третичных методов воздействия на пласт [4–7]. Решения по оптимизации системы заводнения и оценке взаимовлияния скважин оцениваются в гидродинамическом симуляторе [8]. Для прогноза сценарных вариантов разработки трудноизвлекаемых запасов также применяется геолого-гидродинамическое моделирование. В современных симуляторах имеется широкий набор инструментов для моделирования термических методов воздействия на пласт, полимерного заводнения и др. [9–11].

Для выполнения достоверных прогнозных расчетов необходимо, чтобы модель с высокой точно-

стью отражала геологическое строение пласта, латеральную и вертикальную неоднородность, фильтрационные характеристики объекта [12–14]. Если свойства по стволу скважины известны по результатам геофизических и гидродинамических исследований, а также по результатам изучения керна, то в межскважинном пространстве сохраняется неопределенность различной степени [15–18]. Поэтому необходимо производить адаптацию модели к фактическим промысловым данным. Вопросы адаптации геолого-гидродинамической модели широко освещаются в [19–21]. Однако универсального способа адаптации на сегодняшний день не предложено, существуют лишь основные направления и рекомендации, но для конкретного месторождения всегда присутствуют свои особенности в настройке модели [22–24].

Настройка любой геолого-технологической модели начинается с модификации макропараметров, которые влияют на адаптацию интегральных показателей, таких как энергетическое состояние залежи, отборы жидкости и обводненность. Подбор этих параметров зачастую производится экспертно специалистом путем итерационных расчетов и получения результатов при тех или иных значениях. Однако ввиду огромного количества неопределенностей и взаимозаменяемости инструментов адаптации, которые могут одинаково влиять на настраиваемый промысловый показатель, можно добиться желаемого результата, выбрав неверный инструмент. Поэтому в процессе настройки модели необходимо наибольшим образом сохранять «геологический реализм» [25–28]. К основным макропараметрам можно отнести влияние законтурной области, абсолютную проницаемость пласта-коллектора, а также относительные фазовые проницаемости (ОФП). Одним из важнейших инструментов настройки модели являются ОФП флюидов [29, 30].

При наличии обширной базы керновых исследований для пласта с высокой зональной изменчивостью фильтрационно-емкостных свойств допустимый коридор изменения кривых ОФП может быть достаточно широким [31]. Тогда возникает проблема выбора корректного инструмента настройки модели. Ошибка на этапе выбора настраиваемого параметра, с последующей настройкой модели на фактические данные даже при хорошей сходимости, может привести к некорректному прогнозу промысловых показателей [32]. Кроме того, для моделей крупных месторождений и залежей с трудноизвлекаемыми запасами немаловажным фактором является снижение количества итераций ввиду значительного времени расчета таких моделей даже при высоких вычислительных мощностях [33].

Накопленный опыт моделирования показывает, что использовать напрямую кривые ОФП, полученные по результатам лабораторных исследований, не представляется возможным. Основные проблемы, связанные с таким подходом, – искусственное занижение продуктивности скважин по мере заводнения пласта, быстрое продвижение фронта воды. Существуют различные методики для учета и настройки кривых ОФП в гидродинамической модели. Основной подход заключается в нормировке и аппроксимации результатов керновых исследований [34–36]. Существует множество корреляций, используемых для аппроксимации кривых ОФП, однако на сегодняшний день наиболее популярными являются корреляции Кори и LET (Lomeland, Ebeltoft, Thomas являются авторами методики) [37–39].

С целью снижения неопределенности при подборе формы кривых ОФП, описывающих процесс вытеснения нефти в пласте, в данной работе предложена методика автоматизированной настройки ОФП, позволяющая снизить субъективность подбора кривых ОФП для дальнейшего использования в модели.

В работе представлено описание использованных материалов, а именно геолого-гидродинамические модели ряда месторождений Волго-Уральской и Тимано-Печорской нефтегазовых провинций, фактические и теоретические кривые ОФП. Выполнено описание методов исследования, таких как программирование в среде Python, статистический анализ, гидродинамическое моделирование. Далее приведено описание результатов исследований, даны рекомендации по их использованию, и описано направление будущих исследований.

Материалы и методы

В рамках исследования разработан автоматизированный подход по настройке кривых ОФП для гидродинамической модели, позволяющих наилучшим образом описывать процесс фильтрации флюида в пласте. Сам алгоритм расчетов заключается в использовании функции Бакли–Лeverетта. Залежь рассматривается как конечный поровый объем, заполненный жидкостью, при этом в основе фильтрации жидкости заложен принцип материального баланса. Кривая фракционного потока является одной из разновидностей характеристик вытеснения и представляет собой зависимость обводненности продукции от водонасыщенности.

Таким образом, зная начальные запасы нефти в залежи и коэффициент начальной нефтенасыщенности можно выразить водонасыщенность через изменение запасов в залежи (1)–(6).

$$Q_{nn} = V_{пор} \cdot K_{nn}, \quad (1)$$

$$Q_{ni} = V_{пор} \cdot K_{ni}, \quad (2)$$

$$Q_{nn}/K_{nn} = Q_{ni}/K_{ni}, \quad (3)$$

$$K_{ni} = Q_{ni}/Q_{nn} \cdot K_{nn}, \quad (4)$$

$$Q_{ni} = Q_{nn} - Q_{нак}, \quad (5)$$

$$K_{vi} = 1 - K_{ni}, \quad (6)$$

где K_{nn} – коэффициент начальной нефтенасыщенности; K_{ni} – коэффициент нефтенасыщенности на i -временной шаг; Q_{nn} – начальные запасы нефти; Q_{ni} – запасы нефти на i -временной шаг; $V_{пор}$ – поровый объем; $Q_{нак}$ – накопленная добыча нефти на i -временной шаг; K_{vi} – коэффициент водонасыщенности на i -временной шаг.

Полученный график зависимости обводненности от водонасыщенности описывает процесс вытеснения нефти из порового пространства. Чем больше период разработки залежи, тем точнее будет форма ОФП. Далее необходимо рассчитать кривые относительных фазовых проницаемостей на основе LET-аппроксимации (7), (8) [40].

$$K_{ro} = \frac{K_{rorg} \cdot (1 - S_{wn})^{L_o}}{(1 - S_{wn})^{L_o} + E_o \cdot (S_{wn})^{T_o}}, \quad (7)$$

$$K_{rw} = \frac{K_{rwr} \cdot (S_{wn})^{L_w}}{(S_{wn})^{L_w} + E_w \cdot (1 - S_{wn})^{T_w}}. \quad (8)$$

Коэффициенты L , E , T отвечают за кривизну определенной части графика. Выбор метода аппроксимации и подбор переменных, которые являются степенями свободы в имеющихся корреляциях, как правило, выполняется экспертно. В предложенном подходе определение формы кривых выполняется путем подбора степеней свободы аппроксимации до максимальной сходимости уравнения (9):

$$F(sw) = \frac{fw(sw)}{fw(sw) + hw/ho \cdot fo(sw)}, \quad (9)$$

где $fw(sw)$ – относительная фазовая проницаемость воды; $fo(sw)$ – относительная фазовая проницаемость нефти; hw , ho – динамические вязкости воды и нефти; $F(sw)$ – функция Бакли–Левретта.

Математически сходимость графиков определялась методом наименьшей суммы квадратов разностей.

Алгоритм предложенной методики расчета кривых ОФП представлен на рис. 1.

Апробация методики выполнялась на залежах с терригенным и карбонатным типом коллектора Волго-Уральской и Тимано-Печорской нефтегазовых провинций.

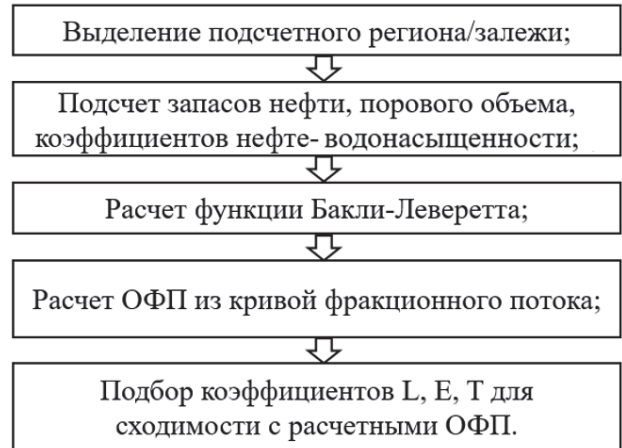


Рис. 1. Алгоритм расчета относительных фазовых проницаемостей

Fig. 1. Algorithm for calculation of relative phase permeabilities

При этом среди залежей с карбонатным типом коллектора изучались в том числе и залежи с высоковязкими нефтями. Для каждого объекта разработки выполнен расчет кривой фракционного потока и получены расчетные кривые относительных фазовых проницаемостей. Для оценки корректности выполненных расчетов проведена процедура верификации данных путем сопоставления расчетных значений с эталонными. В связи с тем, что образец керна не может характеризовать залежь в целом в силу масштабного эффекта и низкого охвата пласта кернавыми исследованиями, анализ выполнялся на основе данных ОФП. Соответственно в качестве эталонных принимались кривые ОФП, полученные по прямым потоковым исследованиям керна и в дальнейшем модифицированные при адаптации моделей к фактической истории разработки.

Результаты

По результатам расчетов с помощью предложенной методики для шести месторождений Пермского края и Республики Коми построены кривые ОФП. Для оценки корректности полученных кривых ОФП построены кроссплоты между расчетными и фактическими кривыми, использованными в ГДМ.

Отмечается высокая сходимость фактических кривых ОФП, настроенных в процессе адаптации ГДМ, с расчетными модельными кривыми. По результатам расчетов построены кроссплоты относительных фазовых проницаемостей воды и нефти для терригенных и карбонатных коллекторов (рис. 2, 3).

По рисункам видно, что сходимость расчетных и полученных в процессе моделирования ОФП достаточно высокая.

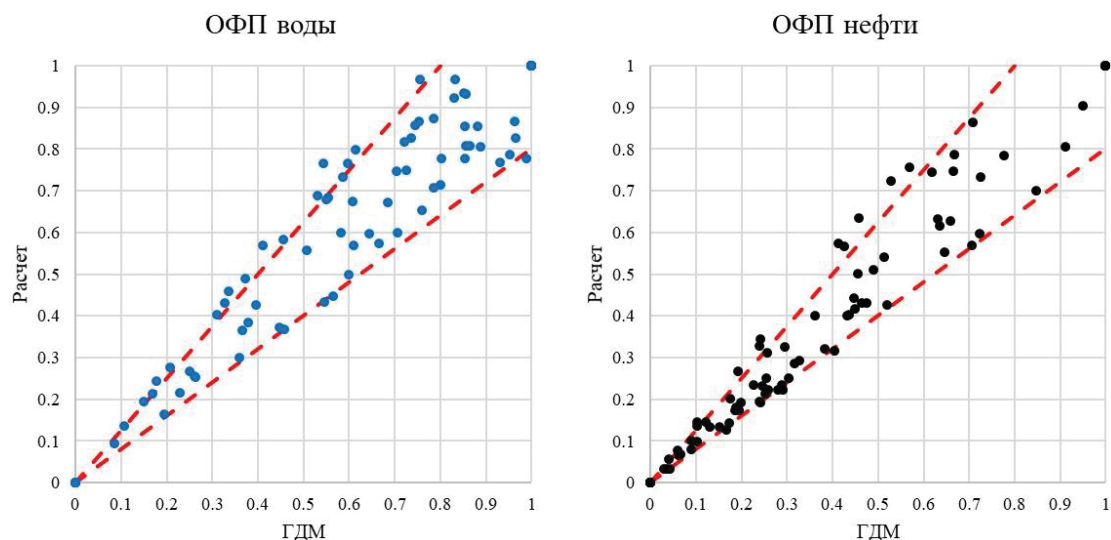


Рис. 2. Кроссплоты относительных фазовых проницаемостей для терригенных коллекторов
Fig. 2. Crossplots of relative phase permeabilities for terrigenous reservoirs

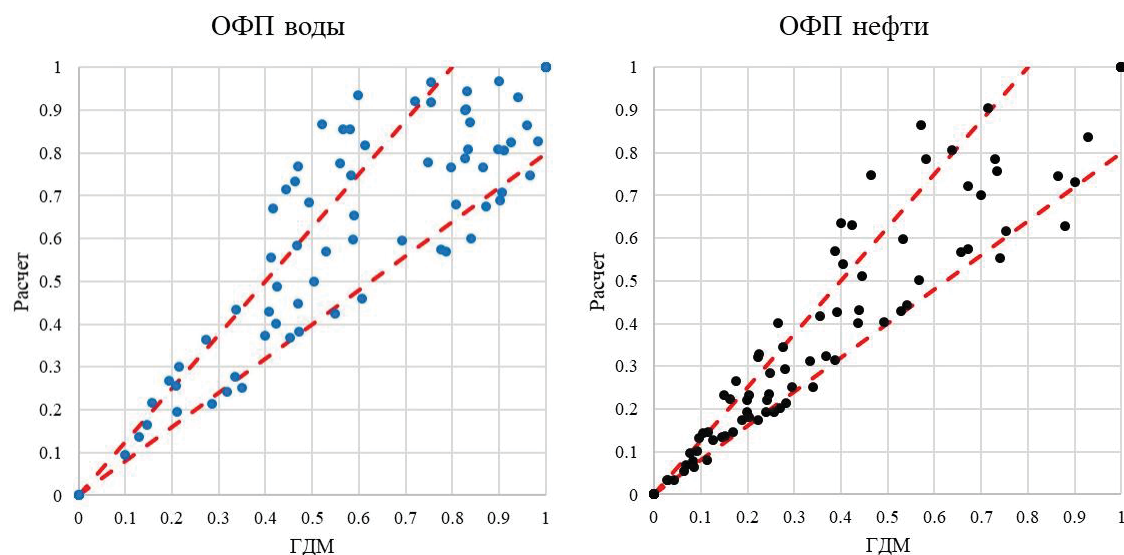


Рис. 3. Кроссплоты относительных фазовых проницаемостей для карбонатных коллекторов (красной линией показан интервал 20 % погрешности)
Fig. 3. Crossplots of relative phase permeabilities for carbonate reservoirs (red line shows 20% error interval)

Так, для терригенных образцов в допустимый интервал попало 78 % значений, а для карбонатных – 69 % значений. Стоит отметить, что для карбонатных коллекторов «выбросов» из коридора допустимых значений больше. Это объясняется тем, что среди залежей, участвовавших в апробации методики, часть находится на второй и третьей стадиях разработки, что не позволяет построить достоверную кривую фракционного потока для всего периода разработки. Значительную долю погрешности в расчете также вносит трещинная составляющая, что значительно влияет на разницу формы ОФП по сравнению с фильтрацией в матрице. С целью повышения качества расчетных дан-

ных для таких залежей необходимо привлекать данные объектов-аналогов. Кроме того, залежи с карбонатным типом коллектора характеризуются прорывным типом обводнения, иногда осложненного резкими скачками, обусловленными в основном технологическими мероприятиями и влиянием трещинной или высококавернозной составляющей пустотного пространства.

Как упоминалось ранее, применение данной методики рассчитано на работу с моделями залежей с трудноизвлекаемыми запасами нефти, когда итерационность расчетов значительно ниже по сравнению с моделями традиционных залежей. Основной задачей методики является автоматизация рутин-

ных процессов подбора макропараметров и минимизация субъективности настройки. В связи с этим методика, предложенная в данной работе, описана машинным кодом на языке программирования Python, что позволило кратно снизить трудозатраты по решению задачи подбора ОФП.

Апробация методики проведена на примере месторождения с трудноизвлекаемыми запасами. Месторождение Р характеризуется сложным строением карбонатного резервуара, наличием зон высокой кавернозности и трещиноватости, абсолютная проницаемость объекта изменяется от 10 до 5000 мД. Разработка залежи осложнена аномальными физико-химическими свойствами флюидов. Вязкость нефти находится в диапазоне 500–1000 мПа*с. Действующий фонд скважин более 700 единиц.

Гидродинамическая модель содержит порядка 5 млн активных ячеек, модель трехфазная неизотермическая, время одной итерации расчета исторического периода составляет порядка 3 суток.

Для залежи Р по формулам (1)–(9) выполнен расчет кривой фракционного потока. График кривой представлен на рис. 4.

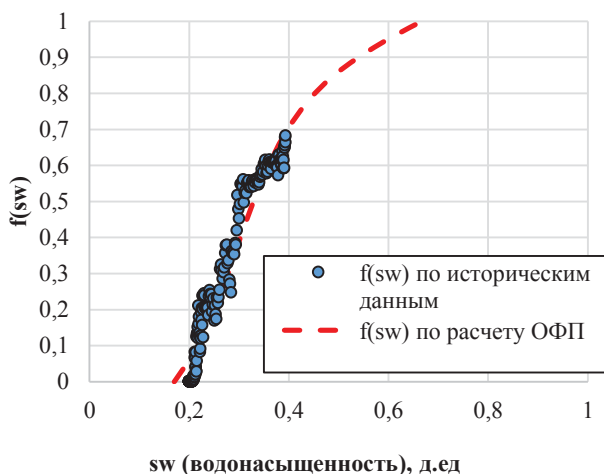


Рис. 4. Кривая фракционного потока для залежи Р

Fig. 4. Fractional flow curve for deposit P

Далее по методике, предложенной в данной работе, произведен расчет по оптимизационному алгоритму формы кривых ОФП. Достигнута максимальная сходимость при наименьшей сумме квадратов разностей всех точек кривых. Степени свободы LET-аппроксимации находятся в диапазоне от 1 до 3. На рис. 5 представлен график сопоставления исходных кривых, полученных по результатам керновых исследований, кривых, полученных в результате работ по геолого-гидродинамическому моделированию, и кривых, полученных расчетным путем.

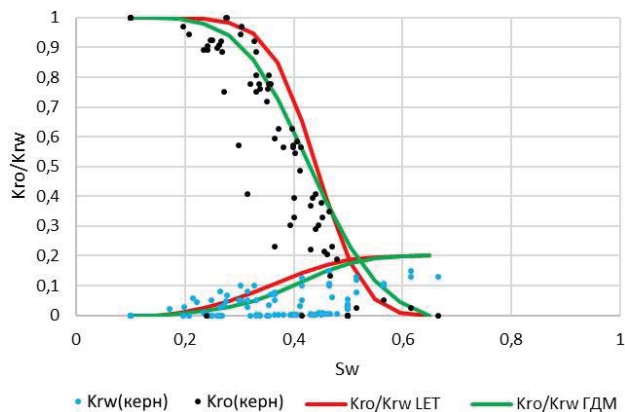


Рис. 5. Относительные фазовые проницаемости для залежи Р

Fig. 5. Relative phase permeabilities for deposit P

Таким образом, можно сделать вывод о том, что расчетные кривые повторяют форму кривых, настроенных в процессе итерационного моделирования. Однако время, затраченное на получение ОФП путем математических расчетов, кратно меньше времени даже одной итерации расчета модели.

На рис. 6 представлено сопоставление интегральных показателей разработки с расчетными на модели после процедуры подбора ОФП для залежи Р. Как видно из графика, достигнута высокая сходимость объемности продукции скважин в целом по залежи.

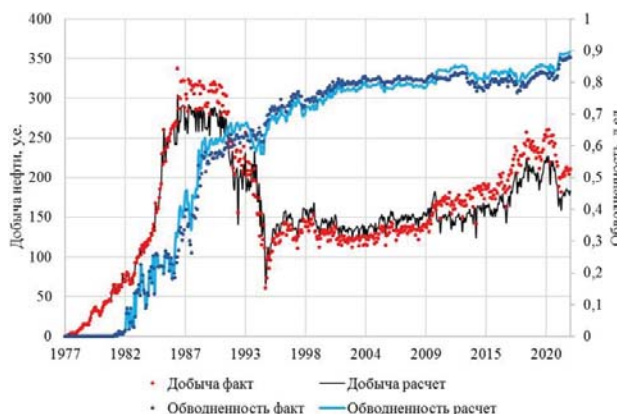


Рис. 6. Сравнение фактических и расчетных показателей разработки залежи Р

Fig. 6. Comparison of actual and estimated development indicators of deposit P

На следующем этапе проведен ретроспективный прогноз по новым скважинам. За последний год по результатам эксплуатационного бурения на объекте пробурено пять новых скважин. В рамках эксперимента проведены расчеты модели с учетом данных скважин и без дополнительных настроек, чтобы проверить способность гидродинамической модели с полученными ОФП и оценить эффективность бурения новых

скважин. По результатам расчетов отклонения по добыче нефти по новым скважинам не превышают 8 % (рис. 7). Даже при условии, что все скважины по фактическим данным вступают с обводненностью более 80 %, модель показывает высокую предиктивную способность и позволяет учитывать конусы обводнения.

Заключение

В ходе исследования предложен подход к построению кривых ОФП в системе нефть–вода на основе промысловых данных, позволяющий с высокой точностью воспроизводить процессы фильтрации при разработке месторождений в гидродинамической модели, в том числе и с трудноизвлекаемыми запасами. Выполнена апробация методики на ряде терригенных и карбонатных объектов. Отмечается более высокая сходимость полученных ОФП для терригенных объектов.

Проведена апробация методики на сложнопостроенном карбонатном объекте Р с высокой вязкостью флюида. Отмечается, что в рамках одной итерации удается с высокой степенью сходимость настроить интегральные параметры добычи нефти и обводненности, что позволяет значительно сократить время многоитерационных расчетов.

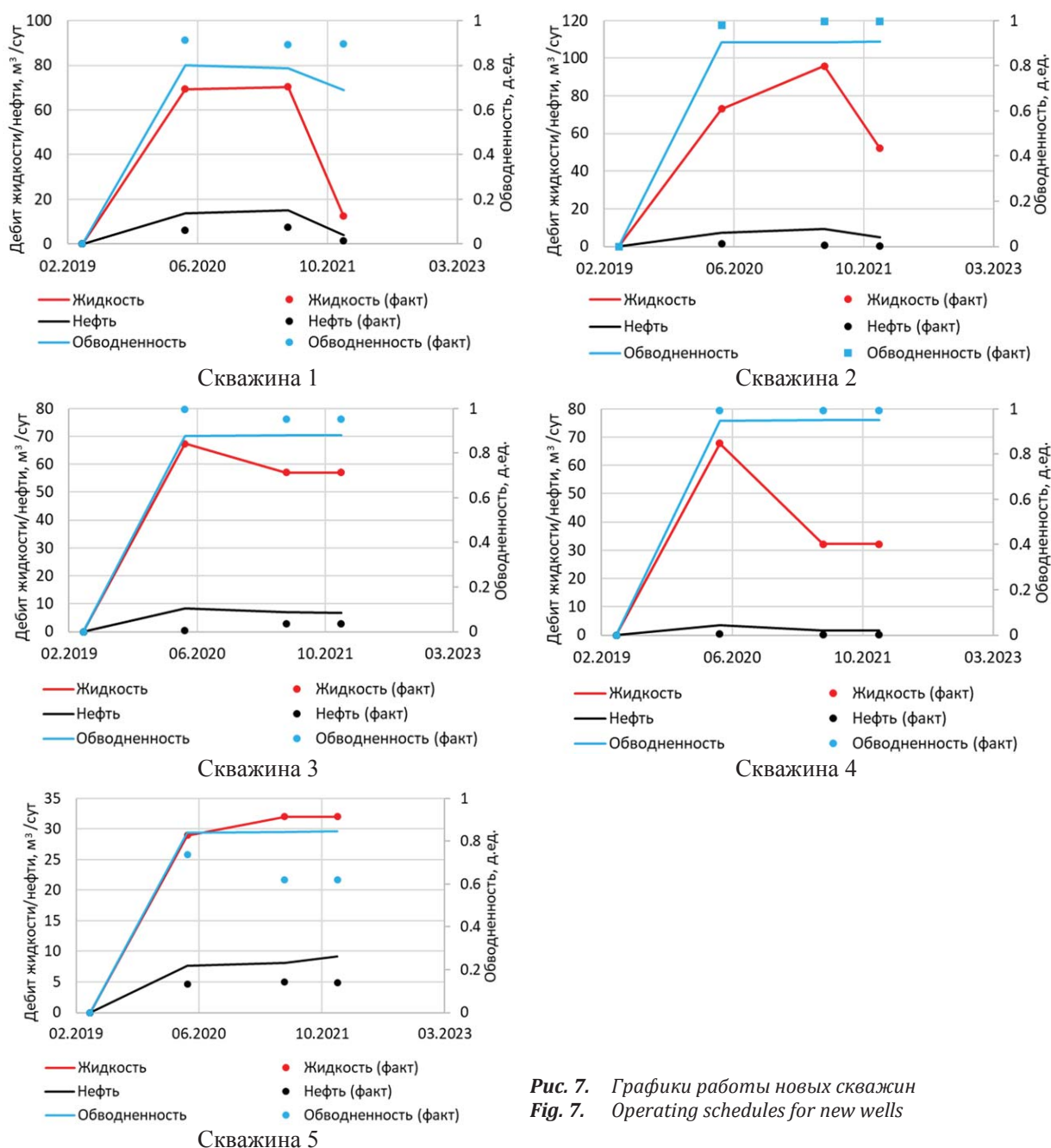


Рис. 7. Графики работы новых скважин
 Fig. 7. Operating schedules for new wells

Отмечается кратное сокращение времени настройки интегральных показателей с нескольких недель до 3 суток (1 итерация модели).

По результатам ретроспективного анализа удалось спрогнозировать на гидродинамической модели мероприятия по эксплуатационному бурению новых скважин.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Закиров Р.Х. Роль геолого-гидродинамического моделирования при проектировании разработки нефтяных месторождений // *Георесурсы*. – 2009. – № 4 (32). – С. 34–36.
2. Aziz K. Reservoir simulation grids: opportunities and problems // *Journal of Petroleum Technology*. – 1993. – Vol. 45. – № 07. – P. 658–663. DOI: 10.2118/25233-PA
3. Abou-Kassem J.H., Farouq-Ali S.M., Islam M.R. *Petroleum Reservoir Simulations*. – Houston: Elsevier, 2013. – 445 p.
4. Воронова Е.В., Петрова Л.В. Гидродинамическое моделирование как средство для оценки эффективности предлагаемых методов увеличения нефтеотдачи // *The Scientific Heritage*. – 2020. – № 54-2 (54). – С. 23–26.
5. Archer J.S., Wong S.W. Use of a reservoir simulator to interpret laboratory waterflood data // *Society of Petroleum Engineers Journal*. – 1973. – Vol. 13. – № 06. – P. 343–347. DOI: 10.2118/3551-PA
6. Hydraulic fracture monitoring to reservoir simulation: maximizing value / C.L. Cipolla, M.J. Williams, X. Weng, M. Mack, S. Maxwell // *European Association of Geoscientists & Engineers: Proc. of the Second EAGE middle east tight gas reservoirs workshop*. – Manama, Bahrain, December 12–15, 2010. – P. cp-244-00015. DOI: 10.3997/2214-4609.20145655
7. Дуркин С.М., Павлюк А.В., Меньшикова И.Н. Обоснование методов повышения нефтеотдачи пласта Кыртаельского нефтегазоконденсатного месторождения на основе численного моделирования // *Нефтепромысловое дело*. – 2015. – № 10. – С. 32–36.
8. Мартюшев Д.А., Менгалиев А.Г. Планирование циклического заводнения на основе анизотропной гидродинамической модели карбонатной залежи Гагаринского месторождения // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2020. – Т. 331. – № 12. – С. 84–93. DOI: 10.18799/24131830/2020/12/2942.
9. A critical review of reservoir simulation applications in key thermal recovery processes: Lessons, opportunities, and challenges / S. Yang, Z. Nie, S. Wu, Z. Li, B. Wang, W. Wu, Z. Chen // *Energy & Fuels*. – 2021. – Vol. 35. – № 9. – P. 7387–7405. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.1c00249
10. Agishev E., Andreev V., Dubinsky G. Choosing a strategy for the development of hard-to-recover oil reserves based on integrated modeling // *EDP Sciences: Proc. of the VI International Conference on Actual Problems of the Energy Complex and Environmental Protection*. – Moscow, August 10, 2023. – Vol. 411. – P. 01062. DOI: 10.1051/e3sconf/202341101062
11. Волженина Д.А., Шарф И.В., Сабанчин И.В. Анализ эффективности применения сайклинг-технологии при разработке залежей газового конденсата // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2020. – Т. 331. – № 5. – С. 18–27. DOI: 10.18799/24131830/2020/5/2633
12. Zhang P., Pickup G., Christie M. A new method for accurate and practical upscaling in highly heterogeneous reservoir models // *SPE: Proc. of the SPE International Oil and Gas Conference and Exhibition*. – China, Beijing, December 5–7, 2006. – P. SPE-103760-MS. DOI: 10.2523/103760-MS
13. Alabert F.G., Modot V. Stochastic models of reservoir heterogeneity: impact on connectivity and average permeabilities // *SPE: Proc. of the SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. – Washington, October 4–7, 1992. – P. SPE-24893-MS. DOI: 10.2118/24893-MS
14. Sinan S., Glover P.W.J., Lorinczi P. Modelling the impact of anisotropy on hydrocarbon production in heterogeneous reservoirs // *Transport in Porous Media*. – 2020. – Vol. 133. – P. 413–436. DOI: 10.1007/s11242-020-01430-z
15. A permeability prediction method based on pore structure and lithofacies / L. Gan, Y. Wang, X. Luo, M. Zhang, X. Li, X. Dai, H. Yang // *Petroleum Exploration and Development*. – 2019. – Vol. 46. – № 5. – P. 935–942. DOI: 10.1016/S1876-3804(19)60250-8
16. Estimating the permeability distribution and its uncertainty at the EGS demonstration reservoir Soultz-sous-Forêts using the ensemble Kalman filter / C. Vogt, G. Marquart, C. Kosack, A. Wolf, C. Clauser // *Water Resources Research*. – 2012. – Vol. 48. – № 8. – P. 8517. DOI: 10.1029/2011WR011673
17. Cremon M.A., Christie M., Gerritsen M.G. Monte Carlo simulation for uncertainty quantification in reservoir simulation: a convergence study // *European Association of Geoscientists & Engineers: Proc. Of the ECMOR XVI-16th European Conference on the Mathematics of Oil Recovery*. – Barcelona, September 3–6, 2018. – Vol. 2018. – № 1. – P. 1–18. DOI: 10.3997/2214-4609.201802226
18. Reservoir management under geological uncertainty using fast model update / R. Hanea, G. Evensen, L. Hustoft, T. Ek, A. Chitu, F. Wilschut // *SPE: Proc. of the SPE Reservoir Simulation Conference*. – Houston, USA, February 23–25, 2015. – P. D031S009R003. DOI: SPE-173305-MS
19. Avansi G.D., Maschio C., Schiozer D.J. Simultaneous history-matching approach by use of reservoir-characterization and reservoir-simulation studies // *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*. – 2016. – Vol. 19. – № 04. – P. 694–712. DOI: 10.2118/179740-PA
20. A physics-based data-driven numerical model for reservoir history matching and prediction with a field application / H. Zhao, Z. Kang, X. Zhang, H. Sun, L. Cao, A. Reynolds // *SPE Journal*. – 2016. – Vol. 21. – № 06. – P. 2175–2194. DOI: 10.2118/173213-PA
21. Fossum K., Mannseth T., Stordal A.S. Assessment of multilevel ensemble-based data assimilation for reservoir history matching // *Computational geosciences*. – 2020. – Vol. 24. – № 1. – P. 217–239. DOI: 10.1007/s10596-019-09911-x
22. Fanchi J.R. *Principles of applied reservoir simulation*. – Burlington: Elsevier, 2005. – 354 p.
23. Islam M.R., Abou-Kassem J.H., Farouq-Ali S.M. *Petroleum reservoir simulation*. – Cambridge: Gulf Professional Publ., 2020. – 516.

24. Ertekin T., Abou-Kassem J.H., King G.R. Basic applied reservoir simulation // SPE Textbook Series: Society of Petroleum Engineers, 2001. – Vol. 7. – 381 p.
25. Slotte P.A., Smørgrav E. Response surface methodology approach for history matching and uncertainty assessment of reservoir simulation models // SPE: Proc. of the SPE Europe featured at EAGE Conference and Exhibition. – Rome, Italy, June 9–12, 2008. – P. SPE-113390-MS. DOI: 10.2118/113390-MS
26. Geology driven history matching / I. Matveev, G. Shishaev, G. Eremyan, V. Demyanov, O. Popova, S. Kaygorodov, B. Belozarov, I. Uzhegova, D. Konoshonkin, M. Korovin // SPE: Proc. of the SPE Russian Petroleum Technology Conference. – Moscow, October 22–24, 2019. – P. D013S001R004. DOI: 10.2118/196881-RU
27. Uncertainty quantification in reservoir prediction: part 1 – model realism in history matching using geological prior definitions / D. Arnold, V. Demyanov, T. Rojas, M. Christie // Mathematical Geosciences. – 2019. – Vol. 51. – P. 209–240.
28. Guo Z., Reynolds A., Zhao H. History matching, prediction and production optimization with a physics-based data-driven model // SPE Journal. – 2018. – Vol. 23. – P. 367–395. DOI: 10.2118/182660-PA
29. Коровин М.О. Учёт влияния относительных фазовых проницаемостей на адаптацию месторождения с терригенным типом коллектора // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 4. – С. 173–180. DOI: <https://doi.org/10.18799/24131830/2021/4/3161>
30. Koutsoyiannis D., Economou A. Evaluation of the parameterization-simulation-optimization approach for the control of reservoir systems // Water Resources Research. – 2003. – Vol. 39. – № 6. – P. 1170. DOI: 10.1029/2003WR002148
31. Honarpour M.M., Chilingarian G.V., Mazzullo S.J. Permeability and relative permeability of carbonate reservoirs // Developments in petroleum science. – 1992. – Vol. 30. – P. 399–416. DOI: 10.1016/S0376-7361(09)70131-1
32. Subbey S., Christie M., Sambridge M. Prediction under uncertainty in reservoir modeling // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2004. – Vol. 44. – № 1–2. – P. 143–153. DOI: 10.1016/j.petrol.2004.02.011
33. Predictive modeling of relative permeability using a generalized equation of state / P. Purswani, R. Johns, Z. Karpyn, M. Blunt // SPE Journal. – 2021. – Vol. 26. – № 01. – P. 191–205. DOI: 10.2118/200410-MS
34. Галкин С.В., Кочнев А.А., Бельтюков Д.А. Аппроксимация кривых относительных фазовых проницаемостей при создании геолого-гидродинамических моделей залежей высоковязкой нефти // Нефтепромысловое дело. – 2022. – № 12. – С. 28–33. DOI: 10.33285/0207-2351-2022-12(648)-28-33
35. Uncertainty quantification and sensitivity analysis for relative permeability models of two-phase flow in porous media / A.R. Valdez, B.M. Rocha, G. Chapiro, R. Weber. // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2020. – Vol. 192. – P. 107297. DOI: 10.1016/j.petrol.2020.107297
36. Захаров Я.В., Шайхутдинов Д.К. Масштабирование относительных фазовых проницаемостей как шаг к повышению качества гидродинамического моделирования // Территория Нефтегаз. – 2015. – № 10. – С. 88–93.
37. Lomeland F. Overview of the LET family of versatile correlations for flow functions // Proc. of the International Symposium of the Society of Core Analysts. – Trondheim, Norway, August 27–30, 2018. – P. 27–30.
38. Andersen P. Comparison of intercept methods for correction of steady-state relative permeability experiments for capillary end effects // SPE Reservoir Evaluation & Engineering. – 2022. – Vol. 25. – P. 882–899. DOI: 10.2118/209797-PA
39. Sakhaei Z., Azin R., Osfouri S. Assessment of empirical/theoretical relative permeability correlations for gas-oil/condensate systems // Proc. of the 1st Biennial Persian Gulf Oil, Gas, and Petrochemistry. – Bushehr, Iran, April 20, 2016. – P. 1–11.
40. History matching field scale model using LET based relative permeability / T.H. Sandve, O. Saevareid, F. Lomeland, R.J. Lorenzen // European Association of Geoscientists & Engineers: Proc. of the ECMOR 2022. – Hague, Netherlands, September 5–7, 2022. – Vol. 2022. – № 1. – P. 1–9. DOI: 10.3997/2214-4609.202244030

Информация об авторах

Дмитрий Александрович Бельтюков, аспирант Горно-нефтяного факультета, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Россия, 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29; di-ma.beltiukov.94@mail.ru

Александр Александрович Кочнев, кандидат технических наук, доцент кафедры геологии нефти и газа, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Россия, 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29; sashakoch93@gmail.com

Лей Ван, PhD, профессор Китайского нефтяного университета, Китай, 266580, провинция Шаньдун, г. Циндао, пр. Чанцзянсилу, 66; skd996159@sdust.edu.cn

Сергей Владиславович Галкин, доктор геолого-минералогических наук, профессор, декан Горно-нефтяного факультета, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Россия, 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29; doc_galkin@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7275-5419>

Поступила в редакцию: 05.03.2024

Поступила после рецензирования: 11.07.2024

Принята к публикации: 24.12.2024

REFERENCES

1. Zakirov R.K. The role of geological-hydrodynamic modeling in the design of oil field development. *Georesources*, 2009, no. 4 (32), pp. 34–36. (In Russ.)

2. Aziz K. Reservoir simulation grids: opportunities and problems. *Journal of Petroleum Technology*, 1993, vol. 45, no. 07, pp. 658–663. DOI: 10.2118/25233-PA
3. Abou-Kassem J.H., Farouq-Ali S.M., Islam M.R. *Petroleum reservoir simulations*. Houston, Elsevier, 2013. 445 p.
4. Voronova E.V., Petrova L.V. Hydrodynamic modeling as a tool for assessing the effectiveness of the proposed methods for increasing oil recovery. *The Scientific Heritage*, 2020, no. 54-2 (54), pp. 23–26. (In Russ.)
5. Archer J.S., Wong S.W. Use of a reservoir simulator to interpret laboratory waterflood data. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 1973, vol. 13, no. 06, pp. 343–347. DOI: 10.2118/3551-PA
6. Cipolla C.L., Williams M.J., Weng X., Mack M., Maxwell S. Hydraulic fracture monitoring to reservoir simulation: maximizing value. *European Association of Geoscientists & Engineers. Proc. of the Second EAGE middle east tight gas reservoirs workshop*. Manama, Bahrain, December 12–15, 2010. pp. cp-244-00015. DOI: 10.3997/2214-4609.20145655
7. Durkin S.M., Pavlyuk A.V., Menshikova I.N. Justification of methods for increasing oil recovery of the Kyrtael oil and gas condensate field based on numerical modeling. *Oilfield Business*, 2015, vol. 10, pp. 32–36. (In Russ.)
8. Martyushev D.A., Mengaliev A.G. Planning of cyclic flooding based on an anisotropic hydrodynamic model of the carbonate reservoir of the Gagarin field. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 12, pp. 84–93. DOI: 10.18799/24131830/2020/12/2942 (In Russ.)
9. Yang S., Nie Z., Wu S., Li Z., Wang B., Wu W., Chen Z. A critical review of reservoir simulation applications in key thermal recovery processes: lessons, opportunities, and challenges. *Energy & Fuels*, 2021, vol. 35, no. 9, pp. 7387–7405. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.1c00249
10. Agishev E., Andreev V., Dubinsky G. Choosing a strategy for the development of hard-to-recover oil reserves based on integrated modeling. *EDP Sciences. Proc. of the VI International Conference on Actual Problems of the Energy Complex and Environmental Protection*. Moscow, August 10, 2023. Vol. 411, pp. 01062. DOI: 10.1051/e3sconf/202341101062
11. Volzhenina D.A., Sharf I.V., Sabanchin I.V. Analysis of the effectiveness of using cycling technology in the development of gas condensate deposits. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 5, pp. 18–27. DOI: 10.18799/24131830/2020/5/2633 (In Russ.)
12. Zhang P., Pickup G., Christie M. A new method for accurate and practical upscaling in highly heterogeneous reservoir models. *SPE. Proc. of the SPE International Oil and Gas Conference and Exhibition in China*. Beijing, December 5–7, 2006. pp. SPE-103760-MS. DOI: 10.2523/103760-MS
13. Alabert F.G., Modot V. Stochastic models of reservoir heterogeneity: impact on connectivity and average permeabilities. *SPE. Proc. of the SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. Washington, October 4–7, 1992. pp. SPE-24893-MS. DOI: 10.2118/24893-MS
14. Sinan S., Glover P.W.J., Lorinczi P. Modelling the impact of anisotropy on hydrocarbon production in heterogeneous reservoirs. *Transport in Porous Media*, 2020, vol. 133, pp. 413–436. DOI: 10.1007/s11242-020-01430-z
15. Gan L., Wang Y., Luo X., Zhang M., Li X., Dai X., Yang H. A permeability prediction method based on pore structure and lithofacies. *Petroleum Exploration and Development*, 2019, vol. 46, no. 5, pp. 935–942. DOI: 10.1016/S1876-3804(19)60250-8
16. Vogt C., Marquart G., Kosack C., Wolf A., Clauser C. Estimating the permeability distribution and its uncertainty at the EGS demonstration reservoir Soultz-sous-Forêts using the ensemble Kalman filter. *Water Resources Research*, 2012, vol. 48, no. 8, pp. 8517. DOI: 10.1029/2011WR011673
17. Cremon M.A., Christie M., Gerritsen M.G. Monte Carlo simulation for uncertainty quantification in reservoir simulation: a convergence study. *European Association of Geoscientists & Engineers. Proc. of the ECMOR XVI-16th European Conference on the Mathematics of Oil Recovery*. Barcelona, September 3–6, 2018. Vol. 2018, no. 1, pp. 1–18. DOI: 10.3997/2214-4609.201802226
18. Hanea R., Evensen G., Hustoft L., Ek T., Chitu A., Wilschut F. Reservoir management under geological uncertainty using fast model update. *SPE. Proc. of the SPE Reservoir Simulation Conference*. Houston, USA, February 23–25, 2015. pp. D031S009R003. DOI: SPE-173305-MS
19. Avansi G.D., Maschio C., Schiozer D. J. Simultaneous history-matching approach by use of reservoir-characterization and reservoir-simulation studies. *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*, 2016, vol. 19, no. 04, pp. 694–712. DOI: 10.2118/179740-PA
20. Zhao H., Kang Z., Zhang X., Sun H., Cao L., Reynolds A. A physics-based data-driven numerical model for reservoir history matching and prediction with a field application. *SPE Journal*, 2016, vol. 21, no. 06, pp. 2175–2194. DOI: 10.2118/173213-PA
21. Fossum K., Mannseth T., Stordal A. S. Assessment of multilevel ensemble-based data assimilation for reservoir history matching. *Computational geosciences*, 2020, vol. 24, no. 1, pp. 217–239. DOI: 10.1007/s10596-019-09911-x
22. Fanchi J.R. Principles of applied reservoir simulation. Burlington, Elsevier, 2005. 354 p.
23. Islam M.R., Abou-Kassem J.H., Farouq-Ali S.M. *Petroleum reservoir simulation*. Cambridge, Gulf Professional Publ., 2020. 516 p.
24. Ertekin T., Abou-Kassem J.H., King G.R. Basic applied reservoir simulation. *SPE Textbook Series. Society of Petroleum Engineers*, 2001, vol. 7, 381 p.
25. Slotte P.A., Smørgrov E. Response surface methodology approach for history matching and uncertainty assessment of reservoir simulation models. *SPE. Proc. of the SPE Europe featured at EAGE Conference and Exhibition*. Rome, June 9–12, 2008. pp. SPE-113390-MS. DOI: 10.2118/113390-MS
26. Matveev I., Shishaev G., Eremyan G., Demyanov V., Popova O., Kaygorodov S., Belozarov B., Uzhegova I., Konoshonkin D., Korovin M. Geology driven history matching. *SPE. Proc. of the SPE Russian Petroleum Technology Conference*. Moscow, October 22–24, 2019. pp. D013S001R004. DOI: 10.2118/196881-RU
27. Arnold D., Demyanov V., Rojas T., Christie M. Uncertainty quantification in reservoir prediction: part 1 – model realism in history matching using geological prior definitions. *Mathematical Geosciences*, 2019, vol. 51, pp. 209–240.
28. Guo Z., Reynolds A., Zhao H. History matching, prediction and production optimization with a physics-based data-driven model. *SPE Journal*, 2018, vol. 23, pp. 367–395. DOI: 10.2118/182660-PA

29. Korovin M.O. Taking into account the influence of relative phase permeabilities on the adaptation of a field with a terrigenous type of reservoir. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 4, pp. 173–180. DOI: <https://doi.org/10.18799/24131830/2021/4/3161> (In Russ.)
30. Koutsyiannis D., Economou A. Evaluation of the parameterization-simulation-optimization approach for the control of reservoir systems. *Water Resources Research*, 2003, vol. 39, no. 6, pp. 1170. DOI: 10.1029/2003WR002148
31. Honarpour M.M., Chilingarian G.V., Mazzullo S.J. Permeability and relative permeability of carbonate reservoirs. *Developments in petroleum science*, 1992, vol. 30, pp. 399–416. DOI: 10.1016/S0376-7361(09)70131-1
32. Subbey S., Christie M., Sambridge M. Prediction under uncertainty in reservoir modeling. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2004, vol. 44, no. 1–2, pp. 143–153. DOI: 10.1016/j.petrol.2004.02.011
33. Purswani P., Johns R., Karpyn Z., Blunt M. Predictive modeling of relative permeability using a generalized equation of state. *SPE Journal*, 2021, vol. 26, no. 1, pp. 191–205. DOI: 10.2118/200410-MS
34. Galkin S.V., Kochnev A.A., Beltiukov D.A. Approximation of relative phase permeability curves when creating geological and hydrodynamic models of high-viscosity oil deposits. *Oilfield Business*, 2022, no. 12, pp. 28–33. (In Russ.) DOI: 10.33285/0207-2351-2022-12(648)-28-33
35. Valdez A.R., Rocha B.M., Chapiro G., Weber R. Uncertainty quantification and sensitivity analysis for relative permeability models of two-phase flow in porous media. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2020, vol. 192, pp. 107297. DOI: 10.1016/j.petrol.2020.107297
36. Zakharov Y.V., Shaikhutdinov D.K. Scaling relative phase permeabilities as a step towards improving the quality of hydrodynamic modeling. *Territory Neftegaz*, 2015, no. 10, pp. 88–93. (In Russ.)
37. Lomeland F. Overview of the LET family of versatile correlations for flow functions. *Proc. of the International Symposium of the Society of Core Analysts in Trondheim*. Norway, August 27–30, 2018. pp. 27–30.
38. Andersen P. Comparison of intercept methods for correction of steady-state relative permeability experiments for capillary end effects. *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*, 2022, vol. 25, pp. 882–899. DOI: 10.2118/209797-PA
39. Sakhaei Z., Azin R., Osfouri S. Assessment of empirical/theoretical relative permeability correlations for gas-oil/condensate systems. *Proc. of the 1st Biennial Persian Gulf Oil, Gas, and Petrochemistry*. Bushehr, Iran, April 20, 2016. pp. 1–11.
40. Sandve T.H., Saevareid O., Lomeland F., Lorenzen R.J. History matching field scale model using LET based relative permeability. *European Association of Geoscientists & Engineers. Proc. of the ECMOR 2022*. Hague, Netherlands, September 5–7, 2022. Vol. 2022, no. 1, pp. 1–9. DOI: 10.3997/2214-4609.202244030

Information about the authors

Dmitrii A. Beltiukov, Postgraduate Student, Perm National Research Polytechnic University, 29, Komsomolsky avenue, Perm, 614990, Russian Federation; dima.beltiukov.94@mail.ru

Alexander A. Kochnev, Cand. Sc., Associate Professor, Perm National Research Polytechnic University, 29, Komsomolsky avenue, Perm, 614990, Russian Federation; sashakoch93@gmail.com

Lei Wang, PhD, Professor, China University of Petroleum (Huadong), 66, West Road, Qingdao Changjiang, Huangdao District, 266580, China; skd996159@sdu.edu.cn

Sergey V. Galkin, Dr. Sc., Professor, Perm National Research Polytechnic University, 29, Komsomolsky avenue, Perm, 614990, Russian Federation; doc_galkin@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7275-5419>

Received: 05.03.2024

Revised: 11.07.2024

Accepted: 24.12.2024

УДК 551.464.3 (1-924.71)
DOI: 10.18799/24131830/2025/2/4759
Шифр специальности ВАК: 1.6.6

Распределение химических элементов в системе вода–порода (на примере Железнодорожного ключа в долине реки Ини)

Д.А. Новиков^{1,2✉}, Л.Г. Вакуленко^{1,3}, А.А. Максимова^{1,3}, О.Д. Николенко¹,
А.С. Деркачев¹, Я.В. Фомина (Садыкова)^{1,3}, А.А. Хвощевская⁴

¹ Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, Россия, г. Новосибирск

² Альметьевский Государственный Технологический университет «Высшая школа нефти»,
Россия, г. Альметьевск

³ Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, Россия, г. Новосибирск

⁴ Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск

✉ NovikovDA@ipgg.sbras.ru

Аннотация. *Актуальность* работы заключается в выявлении особенностей распределения химических элементов в системе вода–порода на примере родника Железнодорожный в пределах Обь-Зайсанской складчатой области, активно используемого населением в целях нецентрализованного питьевого водоснабжения. *Цель:* выявить особенности химического и изотопного (^{238}U , ^{234}U , ^{226}Ra , ^{228}Ra) состава родниковых вод и оценить характер равновесий в системе вода–порода. *Методы.* Лабораторное изучение химического состава подземных вод проводилось в Проблемной научно-исследовательской лаборатории гидрогеохимии Инженерной школы природных ресурсов Томского политехнического университета. Данные по общей α - и β -активности природных вод, а также активностям ^{234}U , ^{238}U , ^{226}Ra и ^{228}Ra получены в Центре коллективного пользования научным оборудованием много-элементных и изотопных исследований Института геологии и минералогии СО РАН. Водовмещающие породы изучались методами поляризационной микроскопии в Институте нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН г. Новосибирск и масс-спектрометрией с индуктивно связанной плазмой в химико-аналитическом центре «Плазма», г. Томск. *Результаты.* На территории исследования в основном преобладают сланцы тонкоплитчатые темно-серые, до черных, глинистые, в разной степени обогащенные примесью алевритового и углеродистого материала. Значения отношения $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}} > 8$ и $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}} > 1,5$ указывают на преобладание в источниках сноса магматических пород кислого состава. Для определения климатических условий был применен параметр $\Sigma\text{Ce}/\Sigma\text{Y}$, по которому установлен гумидный климат во время образования пород. Железнодорожный ключ обладает HCO_3^- Mg-Ca составом с величиной общей минерализации 593 мг/дм³; геохимические параметры среды отвечают окислительной обстановке с Eh +202,7 мВ, pH 7,7 и содержанием растворенного кислорода 5,20 мг/дм³. Сравнивая химический состав описанных родниковых вод с химическим составом вмещающих пород, можно предположить, что воды наследуют их состав, что выражено в повторяющихся экстремумах. В сравнении с изученными ранее родниками долины реки Ини воды Железнодорожного ключа обогащены ураном до $4,76 \cdot 10^{-3}$ мг/дм³, что превышает уровень Инских источников ($2,83 \cdot 10^{-3}$ – $4,16 \cdot 10^{-3}$ мг/дм³), но ниже изученных объектов в селе Новолуговое ($3,08 \cdot 10^{-2}$ – $4,56 \cdot 10^{-2}$ мг/дм³). Уран-изотопное отношение (γ) не превышает 1,95. По результатам термодинамических расчетов воды Железнодорожного ключа равновесны с кальцитом и доломитом, а также с каолинитом, что позволяет отнести их к алюминиево-кремнистому геохимическому типу.

Ключевые слова: радоновые воды, изотопы урана и радия, система вода–порода, Железнодорожный ключ, Обь-Зайсанская складчатая область, Западная Сибирь

Благодарности: Полевые и аналитические работы по изучению химического состава природных вод выполнены при финансовой поддержке проектов Министерства науки и высшего образования РФ № FWZZ-2022-0014 и № FSWW-2023-0008, аналитические работы по исследованию геохимических особенностей горных пород – при поддержке проекта № 22-17-20029 Российского научного фонда и Правительства Новосибирской области.

Для цитирования: 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

UDC 551.464.3 (1-924.71)
DOI: 10.18799/24131830/2025/2/4759

Distribution of chemical elements in the water–rock system (based on the example of a Zheleznodorozhny spring in the valley of the Inya river)

D.A. Novikov^{1,2✉}, L.G. Vakulenko^{1,3}, A.A. Maksimova^{1,3}, O.D. Nikolenko¹,
A.S. Derkachev¹, Ya.V. Fomina (Sadykova)^{1,3}, A.A. Khvacshetskaya⁴

¹ Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation

² Almeteyevsk State Technological University «Petroleum High School», Almeteyevsk, Russian Federation

³ Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation

⁴ National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

✉ NovikovDA@ipgg.sbras.ru

Abstract. Relevance. The necessity to identify the characteristics of the distribution of chemical elements in the water–rock system using the example of the Zheleznodorozhny spring within the Ob-Zaisan folded region, actively used by the population for decentralized drinking water supply. **Aim.** To identify the features of the chemical and isotopic (^{238}U , ^{234}U , ^{226}Ra , ^{228}Ra) composition of spring waters and assess the nature of the equilibrium in the water–rock system. **Methods.** Laboratory studies of the chemical composition by means of titration, ion chromatography, mass spectrometry with inductively coupled plasma were carried out at the Research Laboratory of Hydrogeochemistry at the School of Earth Sciences and Engineering of the Tomsk Polytechnic University. The data on the total β -activity of waters, as well as on the activities of ^{234}U , ^{238}U , ^{226}Ra and ^{228}Ra , were obtained at the Center for Collective Use of Scientific Equipment for Multi-Element and Isotope Research Institute of Geology and Mineralogy SB RAS. Water-bearing rocks were studied using polarization microscopy at the Institute of Institute of Oil and Gas Geology and Geophysics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, and inductively coupled plasma mass spectrometry at the Plasma Chemical Analytical Center, Tomsk. **Results.** The study area is mainly dominated by thin-platy dark gray to black clayey shales, enriched to varying degrees with silty and carbonaceous material. Values of the ratio $(\text{La}/\text{Yb})\text{N}>8$ and $(\text{Gd}/\text{Yb})\text{N}>1.5$ indicate the predominance of acidic igneous rocks in the sources. To determine climatic conditions, the parameter $\sum\text{Ce}/\sum\text{Y}$ was used, which established a humid climate during the formation of rocks. The Zheleznodorozhny spring has a HCO_3^- Mg–Ca composition with a total mineralization value of 593 mg/dm³, the geochemical parameters of the environment correspond to an oxidizing environment with Eh +202.7 mV, pH 7.7 and a dissolved oxygen content of 5.20 mg/dm³. Comparing the chemical composition of the described spring waters with the host rocks composition, it can be assumed that the waters inherit their composition, which is expressed in repeating extremes. In comparison with the previously studied springs of the Inya River valley, the waters of the Zheleznodorozhny spring are enriched with uranium up to $4.76 \cdot 10^{-3}$ mg/dm³, which exceeds the level of the Insky springs ($2.83 \cdot 10^{-3}$ – $4.16 \cdot 10^{-3}$ mg/dm³), but is lower than the studied objects in the village of Novolugovoe ($3.08 \cdot 10^{-2}$ – $4.56 \cdot 10^{-2}$ mg/dm³). The uranium isotope ratio (γ) does not exceed 1.95. According to the results of thermodynamic calculations, the waters of the Zheleznodorozhny spring are in equilibrium with calcite and dolomite, as well as with kaolinite, which allows them to be classified as an aluminum-siliceous geochemical type.

Keywords: radon waters, uranium and radium isotopes, water–rock system, Zheleznodorozhny spring, Ob-Zaisan folded region, Western Siberia

Acknowledgements: Field and analytical work to study the chemical composition of natural waters was carried out with the financial support of projects of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation no. FWZZ-2022-0014 and no. FSWW-2023-0008, analytical work to study the geochemical characteristics of rocks – with the support of project no. 22-17-20029 of the Russian Science Foundation and the Government of the Novosibirsk Region.

For citation: Novikov D.A., Vakulenko L.G., Maksimova A.A., Nikolenko O.D., Derkachev A.S., Fomina (Sadykova) Ya.V., Khvacshetskaya 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. DOI: 10.18799/24131830/2025/2/4759

Введение

В настоящее время в научном сообществе появляется все больше работ по изучению проблем формирования химического состава подземных вод

различного изотопно-гидрогеохимического облика. Ни для кого не секрет, что в системе вода–порода первые выступают в качестве наиболее активной составляющей системы, в которой отражаются все

процессы: от природных до наложенных антропогенных. Из водного раствора определенного химического состава формируются последовательно друг за другом вторичные минеральные фазы [1]. Горные породы при этом являются основным источником поступления химических элементов в раствор.

Как отмечалось ранее, радоновые воды являются ярким результатом начальных стадий взаимодействия в системе вода–порода, поскольку радон не мигрирует на значительные расстояния от эманулирующего коллектора [2]. Во многих регионах мира степень гидрогеохимической изученности источников нецентрализованного водоснабжения населения (родников, колодцев и скважин) остается крайне низкой. Изучение состава подземных вод, включая комплекс радиохимических данных, представляет огромную важность при оценке их качества для целей питьевого водоснабжения населения. Согласно UNESCO в мире дефицит ресурсов пресных подземных вод для целей питьевого водоснабжения отмечается на всех континентах и территория Российской Федерации не является исключением, особенно когда речь идет о нецентрализованном водоснабжении населения.

Среди последних комплексных исследований распределения радионуклидов в водах питьевого назначения можно отметить работы, проведенные на территориях Индийского [3–5] и Аравийского [6–8] полуостровов, Африки [9, 10], Европы [11–13], Северной Америки [14, 15] и других [16–18]. Большое внимание этому направлению исследований отводится авторами настоящей работы [19–23]. Целью настоящей работы является получение первых данных по распределению химических элементов в системе вода–порода на примере неизученного ранее Железнодорожного ключа, где нами были выявлены повышенные по сравнению с региональным фоном Западной Сибири содержания урана, а также активность радона и изотопов урана и радия.

Материалы и методы

Во время экспедиционных работ в августе 2023 г. на территории Обь-Зайсанской складчатой области (ОЗСО) были отобраны одна проба воды и 12 образцов пород различных литотипов из обнажения ключа Железнодорожный (рис. 1), ранее были опробованы родники сравнения (12 проб). Непосредственно на объектах было выполнено определение pH, Eh, температуры, содержания растворенного O_2 , HCO_3^- с помощью оборудования (мультипараметровый измеритель pH/OBП/проводимости Hanna HI98195 и оксиметр Hanna HI98198) и полевой гидрогеохимической лаборатории. Последующее лабораторное изучение химического состава методами титриметрии, ионной хромато-

графии, масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ИСП) проводилось в Проблемной научно-исследовательской лаборатории гидрогеохимии Инженерной школы природных ресурсов Томского политехнического университета (аналитики О.В. Чеботарева, Н.В. Бублий, А.С. Погуца, В.В. Куровская, К.Б. Кривцова, Л.А. Ракул). Точность используемых в анализе методов находится в диапазоне от 8 до 26 % и зависит от минерализации вод и содержания в них компонентов.

Данные по общей α - и β -активности природных вод, а также активностям ^{234}U , ^{238}U , ^{226}Ra и ^{228}Ra получены после предварительной радиохимической пробоподготовки на альфа-спектрометре ALPHA-ENSEMBLE-8 (Ametek, ORTEC, США); гамма-спектрометрической системе, скомпонованной на базе колодезного коаксиального HPGe ППД с низкофоновым криостатом EGPC 192-P21/SHF 00-30A-CLF-FA фирмы EURISYS MEASURES (Франция) и альфа-бета радиометре для измерений малых активностей УМФ-2000 с кремниевым детектором (НПО «Доза», Россия). Водовмещающие породы изучались методами поляризационной микроскопии в Институте нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, г. Новосибирск, и масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой в химико-аналитическом центре «Плазма», г. Томск.

Геологическое строение

Объект исследования находится в центральной части ОЗСО, где палеозойский складчатый фундамент представлен сильно дислоцированными породами средне-верхнедевонского возраста, а перекрывающий их чехол – рыхлыми отложениями красnodубровской свиты нижнеэоценового возраста [24]. Объекты исследования находятся в поле распространения юргинской свиты фаменского яруса (D_{3jur}), локально обнажающейся на небольших участках вдоль русла реки Ини. Её мощность здесь может варьировать в пределах 400–1000 м. Краснодубровская свита представлена лессоидными и лимниевыми отложениями: лессами, супесями, суглинками и песками, а также глинами от светло-желтых до бурых. Её мощность составляет порядка 40–60 м. Кроме этого, вдоль русла Ини развиты верхнечетвертичные отложения её надпойменных террас и современные пойменные отложения. Непосредственно родник Железнодорожный расположен на излучине р. Ини на подмываемом берегу в поле распространения юргинской свиты, выходящей непосредственно на дневную поверхность.

В районе исследований можно выделить 2 водоносных горизонта, существенно различающихся по своим фильтрационно-ёмкостным свойствам и литологическому составу: 1) горизонт поровых вод

краснодубровской свиты и 2) водоносная зона трещино-жильных вод юргинской свиты. Данные водоносные тела разделены мел-палеогеновой корой выветривания мощностью до 26 м, которая представлена пестроцветными глинами и может считаться водоупорным горизонтом. В низовьях Ини, по данным [25], она распространена на водоразделах и их склонах, в то время как в речных долинах

вблизи русла эродирована. Так, непосредственно в районе родника кора выветривания отсутствует на расстоянии 500–700 м от русла реки. Следовательно, водоносные горизонты в долинах рек могут иметь гидравлическую связь, а воды четвертичных отложений подпитывать водоносные зоны девонского фундамента.



Рис. 1. Местоположение отбора проб (а), фотографии ключа Железнодорожный (б, в). Условные обозначения: 1 – Железнодорожный ключ; 2 – Инские источники; 3 – родник Новолуговой; 4 – родник Капустный; 5 – породы юргинской свиты

Fig. 1. Sampling location (a), photographs of the Zheleznodorozhny spring (b, c). Legend: 1 – Zheleznodorozhny spring; 2 – Inskie springs; 3 – Novolugovoy spring; 4 – Kapustny spring; 5 – rocks of the Yurginskaya formation

Результаты и обсуждение

Геохимические особенности водовмещающих пород

Изучены водовмещающие отложения юргинской свиты, обнажающиеся в береговых выходах на р. Ини, у поселка Железнодорожный (обн. 601). Здесь преобладают сланцы темно-серые, до черных, глинистые, в разной степени обогащенные примесью алевритового и углеродистого материала, тонкоплитчатые, иногда листоватые (рис. 2, а, б). Среди темного глинистого материала отмечаются тонкие пологоволнистые слойки и линзочки серого алевро-

лита. Хорошо выражена сланцеватость, которая совпадает со слоистостью и плитчатостью либо располагается под углом к ним (рис. 2 в, г). Породы в основном слабо известковистые, с рассеянным тонкокристаллическим пиритом. Вдоль плоскостей скола отмечаются зеркала скольжения, пятнистое развитие оксидов-гидроксидов железа. Характерно проявление нескольких систем трещин с корочками или полным выполнением кальцитом, иногда совместно с кварцем.

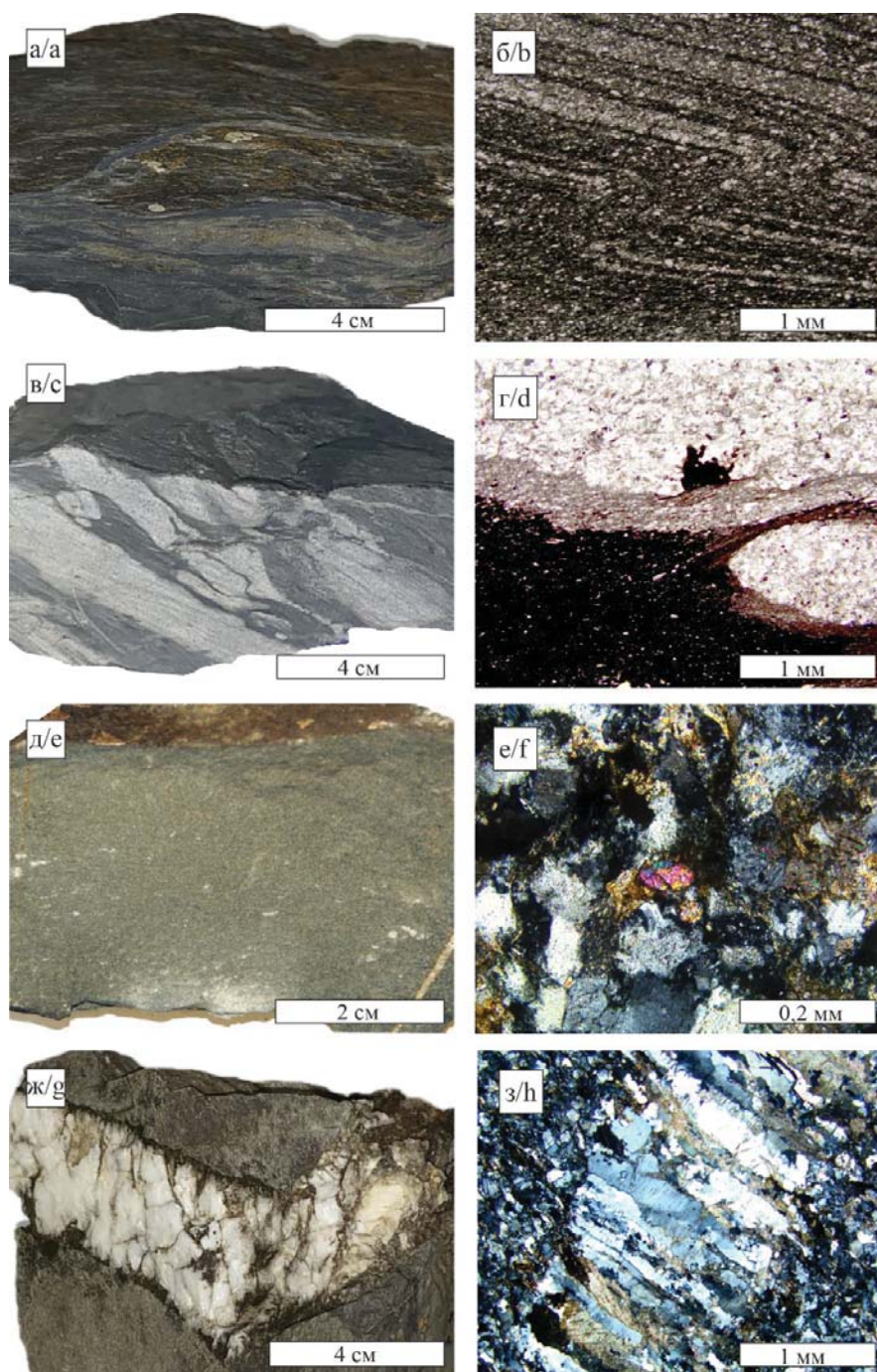


Рис. 2. Фотографии образцов и шлифов водовмещающих пород обн. 601: а, б) алеврито-глинистый сланец; в, г) переслаивание глинистого сланца и крупно-мелкозернистого алевролита; д) мелкозернистый песчаник с акцессорным цирконом (е); ж) прожилок кварца с примесью кальцита и оксидов-гидроксидов Fe; з) трещина, выполненная кварцем и кальцитом, в крупнозернистом алевролите

Fig. 2. Photos of samples and thin sections of water-bearing rocks of outcrop 601: а, b) silt-clayey shale; c, d) interbedded clayey shale and fine-grained siltstone; e) fine-grained sandstone, with accessory zircon (f); g) quartz veinlets with an admixture of calcite and Fe oxides-hydroxides; h) crack filled with quartz and calcite in coarse-grained siltstone

По результатам рентгеноструктурного анализа в составе глинистого вещества сланцев установлено близкое содержание диоктаэдрической слюды $2M_1$ мусковитового типа (15–30 % валовой пробы) и Fe-Mn-Mg хлорита (15–25 %). Значительную долю составляет кварц (20–25 %) и полевой шпат, преимущественно альбит (10–25 %). Постоянно отмечается небольшое количество карбонатных минералов: кальцита, в том числе и магнезиального (от следовых количеств до 10 %) и сидерита (<5 %). Иногда встречается акцессорный минерал псевдурит.

В меньшей степени в разрезе представлены темные, зеленовато-буровато-серые алеврито-песчаные породы (рис. 2, д) полевошпатово-кварцевого состава с пленочно-поровым глинисто-кальцитовым цементом. Всегда присутствует заметное количество акцессорных титанистых минералов, циркона, иногда сфена и турмалина (рис. 2, е). О значительной степени изменения свидетельствуют: мраморизация кристаллов кальцита в цементе, проявление обильных прерывистых субпараллельно слоистости, выполненных глинисто-слюдисто-углеродистым материалом. Крутонаклонные трещины залечены кальцитом (рис. 2, д), иногда с черной корочкой гематита. О проявлении процессов выветривания в породах свидетельствует развитие рыжевато-коричневых пятен гидроксидов железа, которые наблюдаются и вдоль плоскостей сколов, и вдоль стенок трещин.

В разрезе отмечаются маломощные прожилки жильного кварца (до 2,5 см), располагающиеся под разными углами к слоистости (рис. 2, ж). Среди агрегатов шестоватых кристаллов кварца отмечаются мелкие пятна оксидов-гидроксидов железа, выделения кальцита (рис. 2, з).

Для изученных пород были получены результаты ИСП-МС анализа шести проб. Для более половины из 63 породообразующих и малых, в том числе редкоземельных, элементов (РЗЭ) установлены содержания, сопоставимые со средними содержаниями их в верхней части земной коры [26]. Содержания части элементов в 1,5–2,5 раза ниже, а содержания Sc, Ni, As существенно ниже во всех изученных пробах. Небольшие положительные экскурсы демонстрируют содержания Li, Be, Rb, Ba, Th, U в глинистых сланцах; Na, Cs – в алеврито-песчаных породах; Se больше, чем на порядок, во всех пробах. В составе жильного кварца отмечено уменьшение содержания на один или несколько порядков большинства элементов; в 2,5–5 раз – Ca, Cr, Mn, Cu, Zn, Ge, Sr, Mo, Sb, Pb, Th; и только содержание Se на порядок выше.

Сумма РЗЭ в изученных пробах варьирует от 131,5 до 178,14 г/т. Спектры РЗЭ, нормированные

относительно постархейского австралийского сланца (PAAS), характеризуются слабо дифференцированными, практически горизонтальными кривыми, свидетельствующими об отсутствии каких-то заметных изменений состава РЗЭ относительно рассматриваемого эталона (рис. 3, а). Исключение составляет образец с повышенным содержанием Tb (601-11).

При реконструкции состава пород источников сноса анализируют спектры РЗЭ, нормированные на хондрит (C1). Величина дифференциации легких и тяжелых РЗЭ служит мерой соотношения в петрофонде кислых и основных пород. Значения отношения $(La/Yb)_N < 4$ и пологий характер кривых РЗЭ $((Gd/Yb)_N$ до 1,5) позволяют предполагать существенную роль в источниках сноса магматических пород основного состава. При значении $(La/Yb)_N > 8$ предполагается преобладание в источниках сноса пород кислого состава. Для изученных пород значения отношения $(La/Yb)_N$ варьируют от 9 до 12, характерен крутой наклон кривых РЗЭ, $(Gd/Yb)_N > 1,5$ (1,8–2,3). Все это указывает на преобладание в областях питания кислых магматических пород. Отметим, что значение $(Gd/Yb)_N$ свидетельствует о довольно высокой степени деплетированности тяжелых РЗЭ.

Наличие отрицательной Eu-аномалии типично для кислых магматических пород – $Eu/Eu^* < 0,85$, в то время как в базальтоидах $Eu/Eu^* > 0,85–0,90$ [27]. Европиевая аномалия во всех изученных образцах сланцев варьирует в пределах 0,59–0,71.

О кислом составе петрофонда можно также заключить по положению фигуративных точек составов изученных пород на тригонограмме [28]: все они расположены вблизи поля кислых пород (рис. 3, б).

Для определения примеси эксгальационного материала в породах использовано отношение Ce/La [29, 30]. Его значения, превышающие 2, указывают на преимущественно гидрогенную природу изученных пород, где этот показатель варьирует от 2,05 до 2,18. Об отсутствии гидротермального материала свидетельствует также показатель $Zr/Hf < 50$. В изученных породах его значение варьирует от 34 до 38. Значение цериевой аномалии 0,97–1,04 отвечает окраинно-континентальным обстановкам, характеризующимся отсутствием заметного влияния металлоносных эманаций из срединно-океанических хребтов.

Некоторые элементные индикаторы могут быть использованы для реконструкции условий формирования изучаемых отложений. Для определения климатических условий был применен параметр $\Sigma Ce / \Sigma Y$ (отношение суммы LREE к HREE). Изученные породы характеризуются значениями > 4 (4,34–5,48), что указывает на гумидный климат.

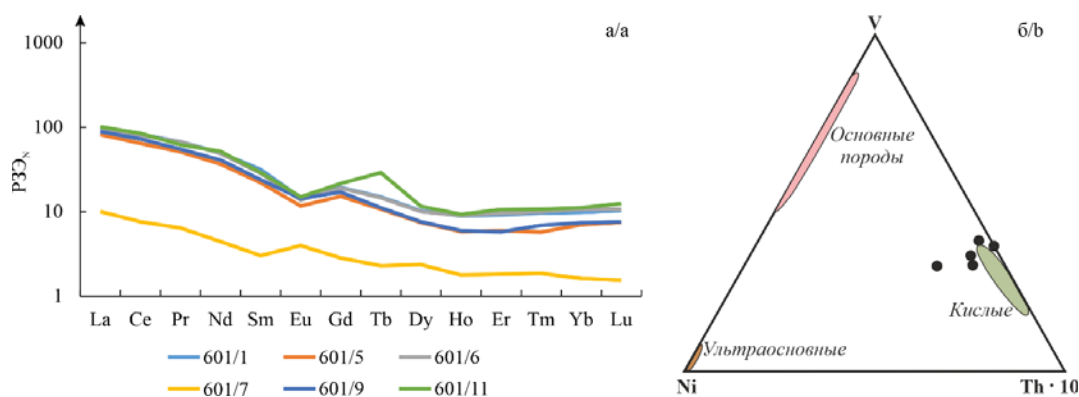


Рис. 3. Спектры редкоземельного состава водовмещающих горных пород (а) и расположение фигуративных точек составов изученных пород на тригонограмме V-Ni-Th·10 [28] (б)

Fig. 3. Rare earth spectra of water-bearing rocks (a) and location of figurative points of the composition of the studied rocks on the trigonogram V-Ni-Th·10 [28] (b)

Геохимическая характеристика родниковых вод

Воды родника Железнодорожный характеризуются гидрокарбонатным магниево-кальциевым составом (рис. 4) с величиной общей минерализации 593 мг/дм^3 , что позволяет отнести их к собственно пресным. Геохимические параметры среды отвечают окислительной обстановке с Eh +202,7 мВ, pH 7,7 и содержанием растворенного кислорода $5,20 \text{ мг/дм}^3$. Был проведен сравнительный анализ вод родника Железнодорожный со средними содержаниями вод зоны гипергенеза [1]. В целом все содержания микрокомпонентов в воде (табл. 1) исследуемого объекта ниже, чем в объекте сравнения, но по некоторым химическим элементам есть превышения. Так, Ca и Sr больше в 3 раза, Sc в 8, Cr и I в 2, Hg в 6, U в 4. Такая ситуация может быть обусловлена тем, что выше по течению реки Иня располагается проявление радоновых вод Инские источники, где геофизическими методами установлена трещиноватая зона, а также дайка спессартитов [22]. Также в работе были рассчитаны коэффициенты концентрации (КК) и водной миграции (Кх) относительно химического состава изученных горных пород, которые показали, что в водах могут накапливаться кальций и ртуть ($\text{КК}=0,01$). По коэффициентам водной миграции установлено, что очень сильной миграционной способностью обладают кальций ($\text{Кх}=13$) и ртуть ($\text{Кх}=12$), сильной – магний ($\text{Кх}=4$), стронций ($\text{Кх}=6$), молибден ($\text{Кх}=7$), уран ($\text{Кх}=4$), средней – литий ($\text{Кх}=0,3$), натрий ($\text{Кх}=0,7$), хром ($\text{Кх}=0,2$), сурьма ($\text{Кх}=0,3$).

Редкоземельный состав родника Железнодорожный характеризуется практически полным спектром элементов, при этом концентрации гадолиния, диспрозия, эрбия и иттербия ниже предела обнаружения. Сумма легких редкоземельных элементов (ЛРЗЭ) составляет $0,11 \text{ мкг/дм}^3$, тяжелых (ТРЗЭ) – $0,007 \text{ мкг/дм}^3$, сумма ЛРЗЭ в 16 раз больше суммы ТРЗЭ.

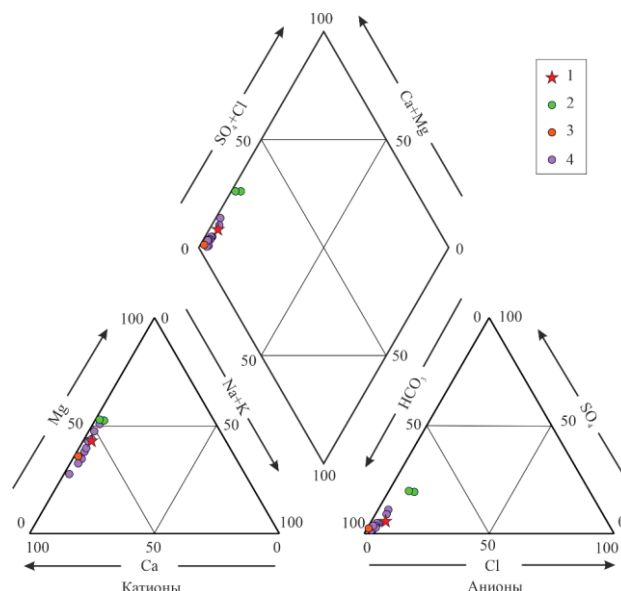


Рис. 4. Диаграмма Пайпера химического состава природных вод долины реки Иня. Условные обозначения: 1 – Железнодорожный ключ; 2 – родник Новолуговой; 3 – родник Капустный; 4 – Инские источники

Рис. 4. Piper diagram of the chemical composition of the natural waters of the Inya River valley. Legend: 1 – Zheleznodorozhny spring; 2 – Novolugovoy spring; 3 – Kapustny spring; 4 – Inskie springs

Спектр РЗЭ можно проследить до европия. От лантана до неодима спектр пологий, от неодима ($0,0007 \text{ мкг/дм}^3$) до европия ($0,0095 \text{ мкг/дм}^3$) наблюдается рост. Вероятно, это связано с тем, что во вмещающих породах присутствует полевой шпат и кальцит, в структуру которых может входить европий, при выщелачивании данных минералов таковой поступает в воды.

Объектами сравнения являются воды Инских источников, родников Капустный и села Новолуговое, которые разгружаются в реку Иню.

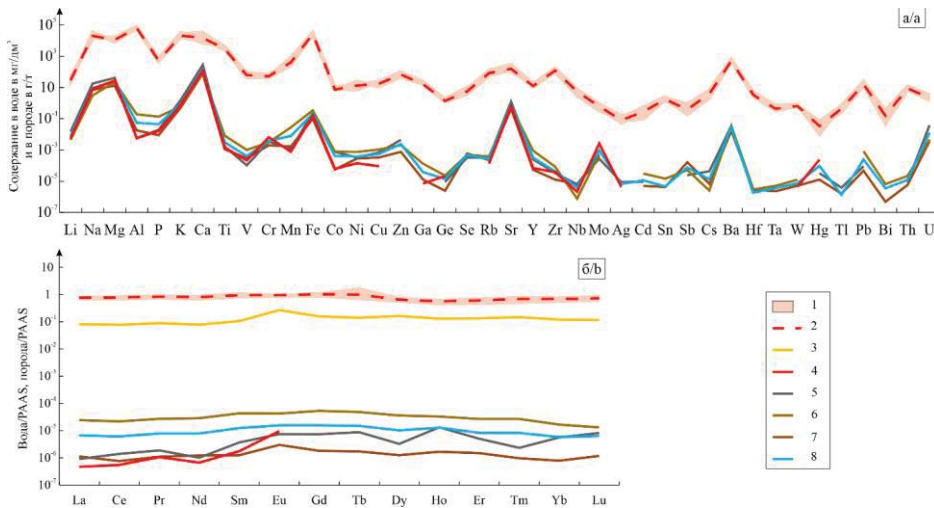


Рис. 5. Спектры распределение микрокомпонентов (а) и РЗЭ (б) в водах и вмещающих породах. Условные обозначения: 1 – глинистые сланцы; 2 – среднее по глинистым сланцам; 3 – кварцевая жила; 4 – Железнодорожный ключ; 5 – родник Новолуговой; 6 – родник Капустный; 7 – Инские источники; 8 – среднее для родников

Fig. 5. Distribution spectra of microcomponents (a) and rare earth elements (b) in waters and host rocks. Legend: 1 – clayey shales; 2 – average for clayey shales; 3 – quartz vein; 4 – Zheleznodorozhny spring; 5 – Novologovoy spring; 6 – Kapustny spring; 7 – Inskie springs; 8 – average for springs

Таблица 1. Химический состав родника Железнодорожный, данные приведены в мг/дм³, если не указано другое
Table 1. Chemical composition of the Zheleznodorozhny spring, data are given in mg/dm³, unless otherwise indicated

Компонент Component	Содержание/Content мг/дм ³ /mg/dm ³	ПДК/МАС	Компонент Component	Содержание/Content мг/дм ³ /mg/dm ³	ПДК/МАС
T, °C	+8	–	Ge	0,000021	–
pH	7,7	–	As	0,00106	0,01
Eh, мВ	+202,7	–	Br	0,049	0,2
O ₂ раств.	5,2	–	Rb	0,000133	–
²²² Rn, Бк/дм ³	68	60	Sr	0,595	7
HCO ₃ ⁻	403	–	Y	0,000068	–
SO ₄ ²⁻	24	500	Zr	0,000038	–
Cl ⁻	15	350	Nb	0,000002	0,01
Ca ²⁺	114	–	Mo	0,0026	0,07
Mg ²⁺	18,3	50	Ru	0,000009	–
Na ⁺	9	200	Rh	0,000019	–
K ⁺	0,79	–	Ag	0,000004	0,05
Мин.	593	1000(1500)	Sb	0,000061	0,005
NH ₄	0,042	1,5	I	0,013	0,125
NO ₃	8,71	45	Ba	0,0212	0,7
П.ок.	0,4	5	La	0,000018	–
Li	0,0053	0,03	Ce	0,000044	–
B	0,073	0,5	Pr	0,000009	–
Al	0,0056	0,2	Nd	0,000023	–
Si	6,2	10	Sm	0,000010	–
P	0,02	–	Eu	0,000010	–
Sc	0,00059	–	Tb	0,000001	–
Ti	0,00142	0,1	Ho	0,000004	–
V	0,00021	0,1	Tm	0,000001	–
Cr	0,00650	0,05	Lu	0,000001	–
Mn	0,0008	0,1	W	0,000004	0,05
Fe	0,156	0,3	Re	0,000004	–
Co	0,000061	0,1	Hg	0,00024	0,0005
Ni	0,00014	0,02	Pb	0,00001	0,01
Cu	0,00009	1	U	0,00476	0,015
Ga	0,000007	–			

Примечание: Мин. – минерализация; П.ок. – перманганатная окисляемость; жирным выделено превышение ПДК; элементы и компоненты, концентрации которых ниже предела обнаружения: NO₂, PO₄, Be, Zn, Se, Pd, Cd, In, Sn, Te, Cs, Gd, Dy, Er, Yb, Hf, Ta, Os, Ir, Pt, Au, Tl, Bi, Th; ПДК [31, 32].

Note: Min. – mineralization; P.ok. – permanganate oxidation; the maximum permissible concentration is shown in bold; elements and components with concentration below the detection limit: NO₂, PO₄, Be, Zn, Se, Pd, Cd, In, Sn, Te, Cs, Gd, Dy, Er, Yb, Hf, Ta, Os, Ir, Pt, Au, Tl, Bi, Th; MPC [31, 32].

Так, воды первых двух источников такого же состава, что и родник Железнодорожный, однако в состав родниковых вод села Новолуговое входят сульфаты, и минерализация повышается до 1049 мг/дм^3 , данный родник расположен ниже по течению р. Ини, чем описанные выше, а также на территории г. Новосибирска. Также в водах установлено высокое содержание урана $0,046 \text{ мг/дм}^3$, что в 3 раза больше предельно допустимых концентраций. Спектры микрокомпонентного состава всех источников имеют одинаковый вид (рис. 5, а), что может указывать на один водоносный горизонт. Редкоземельный состав Инских источников, родников Железнодорожный и в с. Новолуговое схож между собой и находится в небольшом диапазоне значений (рис. 5, б). Однако по редкоземельному составу отличаются воды родника Капустный, где сумма ЛРЗЭ в среднем в 25 раз больше таковой в описанных выше родниках, а сумма ТРЗЭ больше в 14 раз.

Сравнивая химический состав описанных родниковых вод с химическим составом вмещающих пород, можно предположить, что воды наследуют их состав. Это выражено в повторяющихся экстремумах на графике распределения микрокомпонентного состава (рис. 5, а). Также можно заметить, что пики по некоторым элементам не совпадают, к примеру, Se, Mo, Hg и U в воде имеют максимумы, а в породе – минимумы, это может свидетельствовать о высокой миграционной способности данных элементов.

Радиохимические особенности родниковых вод

Активность радона в водах Железнодорожного ключа не превышает $68\text{--}71 \text{ Бк/дм}^3$. Среди изученных шести родников наибольшая активность ^{222}Rn

фиксируется в водах Инских источников, где она может достигать $127\text{--}130 \text{ Бк/дм}^3$ (табл. 2).

В сравнении с ранее изученными родниками долины реки Ини воды Железнодорожного ключа обогащены ураном до $4,76 \cdot 10^{-3} \text{ мг/дм}^3$, что несколько выше, чем в Инских источниках, где его концентрации варьируют в диапазоне от $2,83 \cdot 10^{-3}$ до $4,16 \cdot 10^{-3} \text{ мг/дм}^3$, но ниже концентрации в изученном роднике в селе Новолуговое ($3,08 \cdot 10^{-2}\text{--}4,56 \cdot 10^{-2} \text{ мг/дм}^3$). Содержания тория в водах Железнодорожного ключа находятся ниже их предела обнаружения, тогда как в других родниках концентрации тория составляют от $2,39 \cdot 10^{-6}$ до $1,16 \cdot 10^{-5} \text{ мг/дм}^3$ – в Инских источниках, до $2,12 \cdot 10^{-5} \text{ мг/дм}^3$ – в Капустном роднике и до $8,61 \cdot 10^{-6} \text{ мг/дм}^3$ – в роднике села Новолуговое. $^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$ отношение изменяется от $1,89 \cdot 10^{-4}$ до $4,63 \cdot 10^{-3}$, что является типичным для окислительных геохимических обстановок Обь-Зайсанской складчатой области.

Активность изотопов урана и радия (мБк/дм^3) составляет в водах Железнодорожного ключа: ^{234}U – 150 ± 10 , ^{238}U – 77 ± 6 , ^{226}Ra – 17 ± 2 и ^{228}Ra – 12 ± 1 (табл. 2). Уранизотопное отношение (γ) $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ в слаборадоновых водах равно 1,95. В целом полученные значения активности изотопов урана и радия незначительно превышают значения изученных ранее родников, разгружающихся в долине реки Ини. Так, суммарная β -активность вод варьирует в них от 11 ± 3 до $26 \pm 6 \text{ мБк/дм}^3$, активность (мБк/дм^3): ^{238}U 38 ± 4 – 59 ± 2 ; ^{234}U 117 ± 12 – 141 ± 4 ; ^{226}Ra 10 ± 3 – 18 ± 4 ; ^{228}Ra $0,4 \pm 0,1$ – $7,4 \pm 1,5$. Уранизотопное отношение (γ) в родниках сравнения изменяется от 2,38 до 3,21.

Таблица 2. Радионуклидный состав родников
Table 2. Radionuclide composition of springs

Радионуклиды Radionuclides	Ед. изм. Unit of measurement	Железнодорожный Zheleznodorozhny	Новолуговой Novolugovoy	Капустный Kapustnyy	Инские источники Inskie springs
^{222}Rn	Бк/дм^3 Bq/dm^3	68	$\frac{19-31}{25}$	28	$\frac{5-130}{69}$
Th	мг/дм^3 mg/dm^3	<ПО	$8,60 \cdot 10^{-6}$	$2,10 \cdot 10^{-5}$	$\frac{2,40 \cdot 10^{-6}-1,20 \cdot 10^{-5}}{5,70 \cdot 10^{-6}}$
U		$4,76 \cdot 10^{-3}$	$\frac{3,08 \cdot 10^{-2}-4,56 \cdot 10^{-2}}{3,82 \cdot 10^{-2}}$	$4,58 \cdot 10^{-3}$	$\frac{2,83 \cdot 10^{-3}-4,16 \cdot 10^{-3}}{3,64 \cdot 10^{-3}}$
Th/U		–	$\frac{2,40 \cdot 10^{-6}-1,20 \cdot 10^{-5}}{5,70 \cdot 10^{-6}}$	0,0046	$\frac{0,0006-0,0036}{0,0016}$
Общее бета	мБк/дм^3 mBq/dm^3	14	–	26	$\frac{11-15}{12}$
^{238}U		77	–	59	$\frac{38-48}{42}$
^{234}U		150	–	141	$\frac{117-124}{121}$
^{226}Ra		17	–	10	$\frac{14-18}{15}$
^{228}Ra		12	–	0,4	$\frac{5,7-7,4}{6,3}$
^{238}U	$\mu\text{гр/дм}^3$ $\mu\text{gr/dm}^3$	6,2	–	5,1	$\frac{3,1-3,9}{3,4}$
$^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$		1,95	–	2,39	$\frac{2,58-3,21}{2,88}$
$^{226}\text{Ra}/^{228}\text{Ra}$		1,42	–	25	$\frac{2,37-2,46}{2,42}$

Соотношение активностей $^{226}\text{Ra}/^{228}\text{Ra}$ в исследованных родниковых водах варьирует от 1,4 до 25,0 при среднем значении 6,7. Это может означать, что водовмещающие породы содержат более высокие концентрации ^{226}Ra , чем ^{228}Ra . С другой стороны, это объясняется преимущественным выщелачиванием из вмещающих горных пород изотопа ^{226}Ra по сравнению с ^{228}Ra . Каждый α -распад вызывает разрушение кристаллической решетки и мобилизацию дочерних продуктов. В ряду распада урана ^{238}U изотоп ^{226}Ra образуется после трех последовательных α -распадов, в отличие от изотопа ^{228}Ra , который образуется только в результате одного α -распада изотопа ^{232}Th . Следовательно, разрушение решетки после трех α -распадов больше, чем после одного, что и обуславливает преимущественное накопление в подземных водах ^{226}Ra при взаимодействии в системе вода–порода.

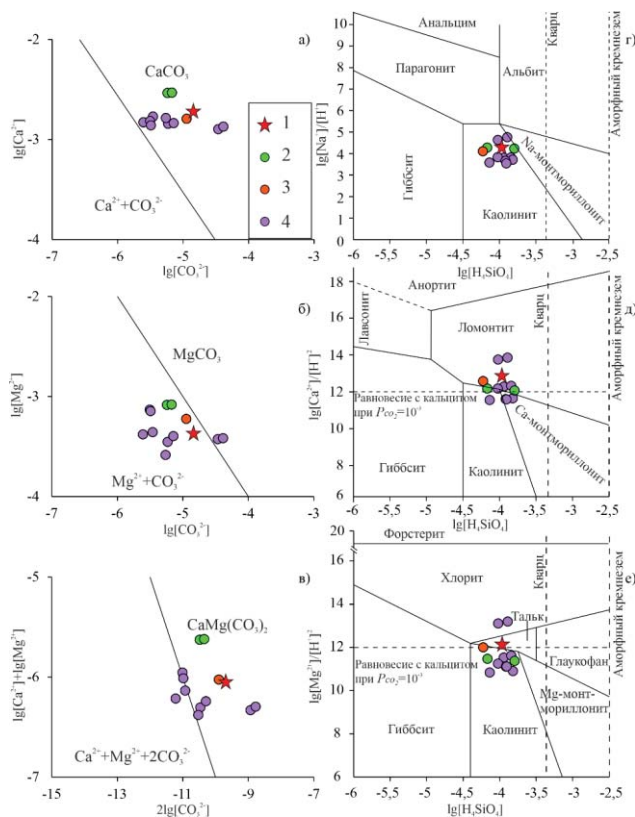


Рис. 6. Диаграммы стабильности карбонатных (а–в) и алюмосиликатных (г–е) минералов при стандартных условиях с нанесением точек состава природных вод долины реки Ини. Условные обозначения: 1 – Железнодорожный ключ; 2 – родник Новолуговой; 3 – родник Капустный; 4 – Инские источники

Fig. 6. Diagrams of stability of carbonate (a–c) and aluminosilicate (d–e) minerals under standard conditions with plotting the composition points of natural waters of the Inya River valley. Legend: 1 – Zheleznodorozhny spring; 2 – Novolugovoy spring; 3 – Kapustny spring; 4 – Inskie springs

Равновесие в системе вода – горная порода

Установлено, что практически все воды насыщены по отношению к карбонатным минералам (рис. 6, а–в), что предполагает осаждение кальцита, доломита и частично магнезита в виде вторичной минеральной фазы. Анализ термодинамических диаграмм с нанесением точек активностей компонентов состава радоновых вод показал, что они локализуются в основном в полях устойчивости слоистых силикатов (каолинит, Са-монтмориллонит, тальк) и цеолитов (ломонтит) (рис. 6, г–е). Среди причин неравновесности системы вода–порода присутствует вынос подземными водами продуктов реакции гидролиза, при которой образуется гидроксильная группа OH^- , уравнивающая заряд подвижных катионов. При этом практически вся образующаяся при гидролизе щелочность нейтрализуется формирующимися кислотными продуктами. Прежде всего это углекислый газ, который, взаимодействуя с гидроксильными группами, формирует гидрокарбонат-ион, что и подтверждается фактическими данными. В связи с этим (по классификации С.Л. Шварцева) их следует отнести к алюминиево-кремнистому геохимическому типу. Впервые для родников долины реки Ини выявлены равновесные составы подземных вод, из которых формируются вторичные минеральные фазы. Так, формирование наиболее широко распространённого в наших условиях каолинита происходит в околонейтральной среде (в среднем pH 7,4) при концентрациях кремния 3,39–9,07 мг/дм³ в растворе и алюминия 0,0002–0,19 мг/дм³.

Заключение

На территории исследования преобладают глинистые сланцы, которые по химическому составу сопоставимы с глинистыми сланцами верхней части земной коры. Значения отношений $(\text{La}/\text{Yb})_N$ $(\text{Gd}/\text{Yb})_N$ указывают на преобладание в областях питания кислых магматических пород.

Воды Железнодорожного ключа собственно пресные, слабощелочные с HCO_3^- Mg–Ca составом и характеризуются окислительной геохимической обстановкой. По составу микрокомпонентов можно предполагать, что воды наследуют состав вмещающих пород. В породах установлена трещиноватость и наличие пятнистой обохренности, что указывает на активное протекание процессов взаимодействия в системе вода–порода.

В водах установлена низкая активность радона-222, которая составляет 68–71 Бк/дм³, а также низкое содержание урана – $4,76 \cdot 10^{-3}$ мг/дм³. Соотношение активностей $^{226}\text{Ra}/^{228}\text{Ra}$ в исследованных родниковых водах варьирует в диапазоне от 1,4 до 25,0 при среднем значении 6,7. Это может означать, что водовмещающие породы содержат более высокие концентрации ^{226}Ra , чем ^{228}Ra . Воды равновес-

ны с кальцитом и доломитом, а также со слоистыми силикатами. Контролирующими факторами вторичного минералообразования выступают рН

среды и концентрации в растворе кремния и алюминия, что позволяет отнести данные воды к алюминиево-кремнистому геохимическому типу.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шварцев С.Л. Гидрогеохимия зоны гипергенеза. – М.: Недра, 1998. – 366 с.
2. 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 // Геология и геофизика. – 2024. – Т. 65. – № 12. – С. 1772–1790. DOI: 10.15372/GiG2024117.
3. Assessment of heavy metals and radionuclides in groundwater and associated human health risk appraisal in the vicinity of Rooppur nuclear power plant, Bangladesh / T.R. Choudhury, J. Ferdous, Md.M. Haque, Md.M. Rahman, S.B. Quraishi, M.S. Rahman // Journal of Contaminant Hydrology. – 2022. – Vol. 254. – Article 104072. DOI: 10.1016/j.jconhyd.2022.104072.
4. Balam V., Rani A., Rathore D.P.S. Uranium in groundwater in parts of India and world: a comprehensive review of sources, impact to the environment and human health, analytical techniques, and mitigation technologies // Geosystems and Geoenvironment. – 2022. – Vol. 1. – Iss. 2. – Article 100043. DOI: 10.1016/j.geogeo.2022.100043.
5. Sukanya S., Noble J., Joseph S. Factors controlling the distribution of radon (222Rn) in groundwater of a tropical mountainous river basin in southwest India // Chemosphere. – 2021. – Vol. 263. – Article 128096. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2020.128096.
6. Natural radioactivity level in Yemen: a systematic review of radiological studies / N.N.M. Maglas, Z. Qiang, M.M.M. Ali, AL-A. Osta, M.S. Alwarqi, M. Najjar // Applied Radiation and Isotopes. – 2024. – Vol. 210. – Article 111343. DOI: 10.1016/j.apradiso.2024.111343.
7. Natural radioactivity in soil and water of Saudi Arabia: a mixed-studies review / M.F. Alotaibi, K.N. Alharbi, E.M. Alosime, L.H. Alhawali, M.M. Albarqi, R.A. Alsulami // Journal of Radiation Research and Applied Sciences. – 2024. – Vol. 17. – Iss. 2. – Article 100897. DOI: 10.1016/j.jrras.2024.100897.
8. Ahmed R.S. The concentration of radioactive materials in Iraqi soils, water and plants: a review // Journal of Radiation Research and Applied Sciences. – 2022. – Vol. 15. – Iss. 1. – P. 245–256. DOI: 10.1016/j.jrras.2022.03.012.
9. Hydrochemical and geological controls on dissolved radium and radon in northwestern Algeria hydrothermal groundwaters / Y. Zemour, N. Mebrouk, A. Mayer, I. Mekebret, M.I. Sherif // Chemosphere. – 2023. – Vol. 313. – Article 137573. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2022.137573.
10. Radiation protection for Gabes phosphate area residents: assessing natural radioactivity in soil and potable water samples / S. Machraoui, G.A. Khouqeer, F. Hosni, S. Labidi // Journal of Radiation Research and Applied Sciences. – 2024. – Vol. 17. – Iss. 3. – Article 100985. DOI: 10.1016/j.jrras.2024.100985.
11. Borrego-Alonso D., Quintana-Arnés B., Lozano J.C. Natural radionuclides behaviour in drinking groundwaters from Castilla y León (Spain); radiological implications // Water Research. – 2023. – Vol. 245. – Article 120616. DOI: 10.1016/j.watres.2023.120616.
12. Radiotoxicity and health risk assessment of 222Rn in groundwater using statistical and Monte Carlo simulation approaches / M.O. Isinkaye, J.I. Agbi, S. Lewicka, M.M. Orosun, E.B. Faweya, F. Matthew-Ojelabi, Y. Ajiboye // Groundwater for Sustainable Development. – 2023. – Vol. 21. – Article 100924. DOI: 10.1016/j.gsd.2023.100924.
13. Borrego-Alonso D., Quintana B., Lozano J.C. Revisiting methods for the assessment of naturally-occurring radioactivity in drinking water // Applied Radiation and Isotopes. – 2023. – Vol. 193. – Article 110667. DOI: 10.1016/j.apradiso.2023.110667.
14. Levels of naturally occurring radioisotopes in local and imported bottled drinking water available in Québec City, Canada / J.-C. Tremblay-Cantin, L. Martin, M. Proulx, N.D. Priest, D. Larivière // Journal of Environmental Radioactivity. – 2024. – Vol. 274. – Article 107411. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2024.107411.
15. Groundwater uranium contamination from produced water disposal to unlined ponds in the San Joaquin Valley / R.A. Tisherman, R.J. Rossi, S.B.C. Shonkoff, D.C. DiGiulio // Science of The Total Environment. – 2023. – Vol. 904, 15. – Article 166937. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.166937.
16. Understanding uranium distribution: a systematic review and meta-analysis in the context of drinking water resources / S. Abolli, N.B. Yazdi, M. Khanizadeh, K. Salemi, M.Z. Bidoki, E.A. Mehrizi // Results in Engineering. – 2024. – Vol. 22. – Article 102152. DOI: 10.1016/j.rineng.2024.102152.
17. Smedley P.L., Kinniburgh D.G. Uranium in natural waters and the environment: distribution, speciation and impact // Applied Geochemistry. – 2023. – Vol. 148. – Article 105534. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2022.105534.
18. A systematic review on groundwater radon distribution with human health consequences and probable mitigation strategy / T. Nayak, S. Basak, A. Deb, P.K. Dhal // Journal of Environmental Radioactivity. – 2022. – Vol. 247. – Article 106852. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2022.106852.
19. Monitoring of radionuclides in the natural waters of Novosibirsk, Russia / D.A. Novikov, F.F. Dultsev, A.F. Sukhorukova, A.A. Maksimova, A.V. Chernykh, A.S. Derkachyov // Groundwater for Sustainable Development. – 2021. – Vol. 15. – Article 100674. DOI: 10.1016/j.gsd.2021.100674.
20. Radon-rich waters of the Tulinka aquifers, Novosibirsk, Russia / D.A. Novikov, Yu.G. Kopylova, A.N. Pyryaev, A.A. Maksimova, A.S. Derkachyov, A.F. Sukhorukova, F.F. Dultsev, A.V. Chernykh, A.A. Khvashchevskaya, P.N. Kalinkin, A.V. Petrozhitsky // Groundwater for Sustainable Development. – 2023. – Vol. 20. – Article 100886. DOI: 10.1016/j.gsd.2022.100886.
21. Hydrogeological conditions and hydrogeochemistry of the Kamenskoye hydro-radon occurrence, Novosibirsk, Russia / D.A. Novikov, F.F. Dultsev, A.A. Maksimova, A.S. Derkachyov, A.V. Chernykh // Geochemistry. – 2023. – Vol. 83. – Iss. 4. – Article 126016. DOI: 10.1016/j.chemer.2023.126016.
22. Об открытии слабарадоновых вод – Инские источники / Д.А. Новиков, Ю.Г. Копылова, А.Ф. Сухорукова, Л.Г. Вакуленко, А.Н. Пыряев, А.А. Максимова, А.С. Деркачев, А.Н. Фаре, А.А. Хвощевская, Ф.Ф. Дульцев, А.В. Черных, М.С. Мельгунов, П.Н. Калинин, С.А. Растигеев // Геология и геофизика. – 2022. – Т. 63. – № 12. – С. 1714–1732.

23. Первые результаты комплексных изотопно-гидрогеохимических исследований Новобибеевского проявления радоновых вод / Д.А. Новиков, Ф.Ф. Дульцев, А.А. Максимова, А.Н. Пыряев, А.Н. Фаге, А.А. Хвашевская, А.С. Деркачев, А.В. Черных // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333. – № 1. – С. 57–72.
24. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1000000 (третье поколение). Серия Алтае-Саянская. Лист N-44. Новосибирск. Объяснительная записка. / Г.А. Бабин, А.И. Черных, А.Г. Головина, С.В. Жигалов, С.С. Долгушин, Е.В. Ветров, Т.В. Кораблева, Н.А. Бодина, Н.А. Светлова, Г.С. Федосеев, А.П. Хилько, В.А. Елифанов, Ю.И. Лоскутов, И.Ю. Лоскутов, М.В. Михаревич, Е.А. Пихутин. – СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2015. – 392 с.
25. Геологическая карта и карта полезных ископаемых дочетвертичных образований. Масштаб: 1:200000, N-44-XII, серия: Кузбасская / под ред. А.Б. Гиндингер. – Новосибирск: Новосибирское территориальное геологическое управление, 1960.
26. Григорьев Н.А. Распределение химических элементов в верхней части континентальной коры. – Екатеринбург: УрО РАН, 2009. – 383 с.
27. Taylor S.R., McLennan S.M. The continental crust: its composition and evolution. – Blackwell, Oxford: Cambridge University Press, 1985. – 312 p.
28. Geochemistry and petrography of Western Tethys Cretaceous sedimentary covers (Corsica and Northern Apennines): from source areas to configuration of margins / L. Bracciali, M. Marroni, L. Pandolfi, S. Rocchi // Sedimentary Provenance and Petrogenesis: Perspective for Petrography and Geochemistry Geological Society of American Special Paper / Eds. J. Arribas, S. Cretelli, M.J. Johnson. – USA, 2007. – Vol. 73. – 93 p.
29. Стрекопытов С.В., Дубинин А.В., Волков И.И. Общие закономерности поведения редкоземельных элементов в пелагических осадках Тихого океана // Литология и полезные ископаемые. – 1999. – № 2. – С. 133–145.
30. Дубинин А.В., Волков И.И. Редкоземельные элементы в металлоносных осадках Восточно-Тихоокеанского поднятия // Геохимия. – 1986. – № 5. – С. 645–662.
31. Постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 30.04.2003 N 78 (ред. от 13.07.2017) «О введении в действие ГН 2.1.5.1315-03» (вместе с «ГН 2.1.5.1315-03. Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования. Гигиенические нормативы», утв. Главным государственным санитарным врачом РФ 27.04.2003) (Зарегистрировано в Минюсте России 19.05.2003 N 4550).
32. СанПиН 2.1.3684-21 Санитарно-эпидемиологические требования к содержанию территорий городских и сельских поселений, к водным объектам, питьевой воде и питьевому водоснабжению, атмосферному воздуху, почвам, жилым помещениям, эксплуатации производственных, общественных помещений, организации и проведению санитарно-противоэпидемических (профилактических) мероприятий (с изменениями на 26 июня 2021 года). – М.: Государственная дума РФ, 2021. – 65 с.

Информация об авторах

Дмитрий Анатольевич Новиков, кандидат геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией гидрогеологии осадочных бассейнов Сибири Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3/6 научный консультант Департамента нефтегазового инжиниринга Передовой инженерной нефтяной школы Альметьевского Государственного Технологического университета «Высшая школа нефти», Россия, 423462, г. Альметьевск, ул. Советская, 186А. NovikovDA@ipgg.sbras.ru. <https://orcid.org/0000-0001-9016-3281>

Людмила Галериевна Вакуленко, кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории седиментологии Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3/6; доцент Новосибирского национального исследовательского государственного университета, Россия, 630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 1. VakylenkoLG@ipgg.sbras.ru

Анастасия Алексеевна Максимова, младший научный сотрудник лаборатории гидрогеологии осадочных бассейнов Сибири Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3/6; ассистент кафедры минералогии и геохимии Новосибирского национального исследовательского университета, Россия, 630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 1. rock.nastaya64@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0002-5068-555X>

Остап Дмитриевич Николенко, ведущий инженер лаборатории седиментологии Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3/6. NikolenkoOD@ipgg.sbras.ru

Антон Сергеевич Деркачев, младший научный сотрудник лаборатории гидрогеологии осадочных бассейнов Сибири Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3/6. a.derkachev@g.nsu.ru. <https://orcid.org/0000-0001-6101-6573>

Яна Владиславовна Фомина (Садыкова), кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории гидрогеологии осадочных бассейнов Сибири Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Коптюга, 3/6; старший научный сотрудник Новосибирского национального исследовательского государственного университета, Россия, 630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 1. SadykovaYV@ipgg.sbras.ru

Альбина Анатольевна Хвощевская, кандидат геолого-минералогических наук, доцент, заведующий проблемной научно-исследовательской лабораторией гидрогеохимии, доцент отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, unrc_voda@mail.ru. <https://orcid.org/0000-0003-4494-2609>

Поступила в редакцию: 01.07.2024

Поступила после рецензирования: 17.01.2025

Принята к публикации: 03.02.2025

REFERENCES

1. Shvartsev S.L. *Hydrogeochemistry of the hypergenesis zone*. Moscow, Nedra Publ., 1998. 366 p. (In Russ.)
2. Novikov D.A., Pyryaev A.N., Sukhorukov V.P., Maksimova A.A., Derkachev A.S., Sukhorukova A.F., Dultsev F.F., Chernykh A.V., Khvashchenskaya 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). *Russian Geology and Geophysics*, 2024, vol. 65, Iss. 12, pp. 1503–1518. DOI: 10.2113/RGG20244716 (In Russ.)
3. Choudhury T.R., Ferdous J., Haque Md.M., Rahman Md.M., Quraishi S.B., Rahman M.S. Assessment of heavy metals and radionuclides in groundwater and associated human health risk appraisal in the vicinity of Rooppur nuclear power plant, Bangladesh. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2022, vol. 254, article 104072. DOI: 10.1016/j.jconhyd.2022.104072.
4. Balam V., Rani A., Rathore D.P.S. Uranium in groundwater in parts of India and world: A comprehensive review of sources, impact to the environment and human health, analytical techniques, and mitigation technologies. *Geosystems and Geoenvironment*, 2022, vol. 1, Iss. 2, article 100043. DOI: 10.1016/j.geogeo.2022.100043.
5. Sukanya S., Noble J., Joseph S. Factors controlling the distribution of radon (^{222}Rn) in groundwater of a tropical mountainous river basin in southwest India. *Chemosphere*, 2021, vol. 263, article 128096. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2020.128096.
6. Maglas N.N.M., Qiang Z., Ali M.M.M., AL-Osta A., Alwarqi M.S., Najar M. Natural radioactivity level in Yemen: A systematic review of radiological studies. *Applied Radiation and Isotopes*, 2024, vol. 210, article 111343. DOI: 10.1016/j.apradiso.2024.111343.
7. Alotaibi M.F., Alharbi K.N., Alosime E.M., Alhawali L.H., Albarqi M.M., Alsulami R.A. Natural radioactivity in soil and water of Saudi Arabia: A mixed-studies review. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, 2024, vol. 17, Iss. 2, article 100897. DOI: 10.1016/j.jrras.2024.100897.
8. Ahmed R.S. The concentration of radioactive materials in Iraqi soils, water and plants: a review. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, 2022, vol. 15, Iss. 1, pp. 245–256. DOI: 10.1016/j.jrras.2022.03.012.
9. Zemour Y., Mebrouk N., Mayer A., Mekebret I., Sherif M.I. Hydrochemical and geological controls on dissolved radium and radon in northwestern Algeria hydrothermal groundwaters. *Chemosphere*, 2023, vol. 313, article. 137573. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2022.137573.
10. Machraoui S., Khouqeer G.A., Hosni F., Labidi S. Radiation protection for Gabes phosphate area residents: Assessing natural radioactivity in soil and potable water samples. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, 2024, vol. 17, Iss. 3, article 100985. DOI: 10.1016/j.jrras.2024.100985.
11. Borrego-Alonso D., Quintana-Arnés B., Lozano J.C. Natural radionuclides behaviour in drinking groundwaters from Castilla y León (Spain); radiological implications. *Water Research*, 2023, vol. 245, article 120616. DOI: 10.1016/j.watres.2023.120616.
12. Isinkaye M.O., Agbi J.I., Lewicka S., Orosun M.M., Faweya E.B., Matthew-Ojelabi F., Ajiboye Y. Radiotoxicity and health risk assessment of ^{222}Rn in groundwater using statistical and Monte Carlo simulation approaches. *Groundwater for Sustainable Development*, 2023, vol. 21, article 100924. DOI: 10.1016/j.gsd.2023.100924.
13. Borrego-Alonso D., Quintana B., Lozano J.C. Revisiting methods for the assessment of naturally-occurring radioactivity in drinking water. *Applied Radiation and Isotopes*, 2023, vol. 193, article 110667. DOI: 10.1016/j.apradiso.2023.110667.
14. Tremblay-Cantin J.-C., Martin L., Proulx M., Priest N.D., Larivière D. Levels of naturally occurring radioisotopes in local and imported bottled drinking water available in Québec City, Canada. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2024, vol. 274, article 107411. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2024.107411.
15. Tisherman R.A., Rossi R.J., Shonkoff S.B.C., DiGiulio D.C. Groundwater uranium contamination from produced water disposal to unlined ponds in the San Joaquin Valley. *Science of The Total Environment*, 2023, vol. 904, 15, article 166937. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.166937.
16. Abolli S., Yazdi N.B., Khanizadeh M., Salemi K., Bidoki M.Z., Mehrizi E.A. Understanding uranium distribution: A systematic review and meta-analysis in the context of drinking water resources. *Results in Engineering*, 2024, vol. 22, article 102152. DOI: 10.1016/j.rineng.2024.102152.
17. Smedley P.L., Kinniburgh D.G. Uranium in natural waters and the environment: Distribution, speciation and impact. *Applied Geochemistry*, 2023, vol. 148, article 105534. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2022.105534.
18. Nayak T., Basak S., Deb A., Dhal P.K. A systematic review on groundwater radon distribution with human health consequences and probable mitigation strategy. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2022, vol. 247, article 106852. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2022.106852.
19. Novikov D.A., Dultsev F.F., Sukhorukova A.F., Maksimova A.A., Chernykh A.V., Derkachyov A.S. Monitoring of radionuclides in the natural waters of Novosibirsk, Russia. *Groundwater for Sustainable Development*, 2021, 15, article 100674. DOI: 10.1016/j.gsd.2021.100674.
20. Novikov D.A., Kopylova Yu.G., Pyryaev A.N., Maksimova A.A., Derkachev A.S., Sukhorukova A.F., Dultsev F.F., Chernykh A.V., Khvashchenskaya A.A., Kalinkin P.N., Petrozhitsky A.V. Radon-rich waters of the Tulinka aquifers, Novosibirsk, Russia. *Groundwater for Sustainable Development*, 2023, 20, article 100886. DOI: 10.1016/j.gsd.2022.100886.

21. Novikov D.A., Dultsev F.F., Maximova A.A., Derkachyov A.S., Chernykh A.V. Hydrogeological conditions and hydrogeochemistry of the Kamenskoye hydro-radon occurrence, Novosibirsk, Russia. *Geochemistry*, 2023, vol. 83. Iss. 4, article 126016. DOI: 10.1016/j.chemer.2023.126016.
22. Novikov D.A., Kopylova Yu.G., Sukhorukova A.F., Vakulenko L.G., Pyryaev A.N., Maksimova A.A., Derkachev A.S., Faguet A.N., Khvashchevskaya A.A., Dultsev F.F., Chernykh A.V., Mel'gunov M.S., Kalinkin P.N., Rastigeev S.A. The Inskie springs: new insights into low-radon waters. *Russian Geology and Geophysics*, 2022, vol. 63, Iss. 12, pp. 1424–1441. DOI: 10.2113/RGG20214337 (In Russ.)
23. Novikov D.A., Dultsev F.F., Maksimova A.A., Pyryaev A.N., Fage A.N., Khvashchevskaya A.A., Derkachev A.S., Chernykh A.V. Initial results of the integrated isotope-hydrogeochemical studies of the Novobibeevo occurrence of radon-rich waters. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, no. 1, pp. 57–72 DOI: 10.18799/24131830/2022/1/3447. (In Russ.)
24. Babin G.A., Chernykh A.I., Golovina A.G., Zhigalov S.V., Dolgushin S.S., Vetrov E.V., Korableva T.V., Bodina N.A., Svetlova N.A., Fedoseev G.S., Khilko A.P., Epifanov V.A., Loskutov Yu.I., Loskutov I.Yu., Mikharevich M.V., Pikhutin E.A. *State geological map of the Russian Federation*. Scale 1:1000000 (third generation). Altai-Sayan series. Sheet N-44 – Novosibirsk. Explanatory letter. St. Petersburg, VSEGEI Cartographic Factory Publ., 2015. 392 p. (In Russ.)
25. *Geological map and map of mineral resources of pre-Quaternary formations*. Scale: 1:200000, N-44-XII, series: Kuzbass. Ed. by A.B. Ginzinger. Novosibirsk, Novosibirsk Territorial Geological Department Publ., 1960. (In Russ.)
26. Grigoriev N.A. *Distribution of chemical elements in the upper part of the continental crust*. Ekaterinburg, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences Publ., 2009. 383 p. (In Russ.)
27. Taylor S.R., McLennan S.M. *The continental crust: its composition and evolution*. Blackwell, Oxford, Cambridge University Press, 1985. 312 p.
28. Bracciali L., Marroni M., Pandolfi L., Rocchi S. *Geochemistry and petrography of Western Tethys Cretaceous sedimentary covers (Corsica and Northern Apennines): from source areas to configuration of margins*. Sedimentary Provenance and Petrogenesis: Perspective for Petrography and Geochemistry. Geological Society of American Special Paper 420: 2007. pp. 73–93.
29. Strekopytov S.V., Dubinin A.V., Volkov I.I. General patterns of behavior of rare earth elements in pelagic sediments of the Pacific Ocean. *Lithology and minerals*, 1999, no. 2, pp. 133–145. (In Russ.)
30. Dubinin A.V., Volkov I.I. Rare earth elements in metalliferous sediments of the East Pacific Rise. *Geochemistry*, 1986, no. 5, pp. 645–662. (In Russ.)
31. *Resolution of the Chief State Sanitary Doctor of the Russian Federation of 30.04.2003 N 78 (as amended on 13.07.2017) "On the introduction of GN 2.1.5.1315-03" (together with "GN 2.1.5.1315-03. Maximum permissible concentrations (MPC) of chemicals in water bodies for domestic and drinking water use and cultural and household water use. Hygienic standards", approved. by the Chief State Sanitary Doctor of the Russian Federation on 27.04.2003) (Registered in the Ministry of Justice of Russia on 19.05.2003 N 4550)*. (In Russ.)
32. *SanPiN 2.1.3684-21 Sanitary and epidemiological requirements for the maintenance of the territories of urban and rural settlements, water bodies, drinking water and drinking water supply, atmospheric air, soils, residential premises, operation of industrial, public premises, organization and implementation of sanitary and anti-epidemic (preventive) measures (as amended on June 26, 2021)*. Moscow, State Duma of the Russian Federation Publ., 2021. 65 p. (In Russ.)

Information about the authors

Dmitry A. Novikov, Cand. Sc., Head of the Laboratory, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3/6, Koptug avenue, Novosibirsk, 630090, Russian Federation; Scientific Consultant, Almeteyevsk State Technological University «Petroleum High School», 186A, Sovetskaya street, Almeteyevsk, 423462, Russian Federation. NovikovDA@ipgg.sbras.ru. <https://orcid.org/0000-0001-9016-3281>

Lyudmila G. Vakulenko, Leading Researcher, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3/6, Koptug avenue, Novosibirsk, 630090, Russian Federation; Associate Professor, Novosibirsk State University, 1, Pirogov street, Novosibirsk, 630090, Russian Federation. Vakylenkolg@ipgg.sbras.ru

Anastasia A. Maksimova, Junior Researcher, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3/6, Koptug avenue, Novosibirsk, 630090, Russian Federation; Assistant, Novosibirsk State University, 1, Pirogov street, Novosibirsk, 630090, Russian Federation. rock.nastaya64@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0002-5068-555X>

Ostap D. Nikolenko, Lead Engineer, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3/6, Koptug avenue, Novosibirsk, 630090, Russian Federation. NikolenkoOD@ipgg.sbras.ru

Anton S. Derkachev, Junior Researcher, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3/6, Koptug avenue, Novosibirsk, 630090, Russian Federation. a.derkachev@gs.nsu.ru. <https://orcid.org/0000-0001-6101-6573>

Yana V. Fomina (Sadykova), Cand. Sc., Senior Researcher, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3/6, Koptug avenue, Novosibirsk, 630090, Russian Federation; Senior Researcher, Novosibirsk State University, 1, Pirogov street, Novosibirsk, 630090, Russian Federation. SadykovaYV@ipgg.sbras.ru

Albina A. Khvashchevskaya, Cand. Sc., Head of the Scientific Laboratory, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. unpc_voda@mail.ru. <https://orcid.org/0000-0003-4494-2609>

Received: 01.07.2024

Revised: 17.01.2025

Accepted: 03.02.2025

УДК 550.47

DOI: 10.18799/24131830/2025/2/4930

Шифр специальности ВАК: 1.6.21

Закономерности концентрирования ртути в годовых кольцах деревьев территорий Сибири (Россия) и Республики Вьетнам

Т.Х.Ш. Ле¹, Н.В. Барановская^{1✉}, Е.Е. Ляпина², М.Г. Крачнакова¹

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

² Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Россия, г. Томск

✉ nata@tpu.ru

Аннотация. Актуальность. Метод дендрогеохимии позволяет определить концентрацию химических элементов в годовых кольцах деревьев. В рамках данной работы была проведена пространственно-временная реконструкция ртутного загрязнения локального и регионального происхождения. **Цель.** Определение особенностей распределения Hg в пространстве и на протяжении длительного времени с целью выявления основных факторов, влияющих на накопление Hg годовыми кольцами сосны, а также установление и выяснение закономерностей в аккумуляции Hg на каждой исследуемой территории. Объектом исследования является керн сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), (Томская, Иркутская области, Республика Бурятия) и сосны далатской (*Pinus dalatensis* Ferré) (Социалистическая Республика Вьетнам). **Методы.** Для исследования отобраны десять кернов в диапазоне календарных лет с 1930 по 2022 гг. Отбор проб проводился с помощью возрастного бурава Haglof. Количество и ширина годовых колец определены с точностью до 0,001 мм на приборе LINTAB в Институте мониторинга климатических и экологических систем СО РАН (г. Томск). Аналитика ртути выполнена на ртутном анализаторе РА-915+ методом атомной абсорбции (метод пиролиза) на базе Инженерной школы природных ресурсов Томского политехнического университета. **Результаты и выводы.** На аккумуляцию Hg древесиной сосны обыкновенной и сосны далатской на исследованных территориях влияние оказывают как природные, так и антропогенные факторы: естественная эманация Hg вследствие дегазации земной коры (Иркутская область и Республика Бурятия); локальный техногенез (Томская область), а также военные действия с применением химического оружия (Республика Вьетнам). В ходе исследования выполнена оценка динамики накопления Hg древесиной на протяжении 93 лет (1930–2021/2023 гг.). В период с 1930 и до конца 1960-х гг. наблюдаются повышенные средние содержания элемента на всех исследованных территориях. Повышенные концентрации Hg в данный период на территории Республики Вьетнам обусловлены трансграничным переносом ртути из континентальной части Восточной Азии, а также применявшимся в ходе войн химическим оружием; на территории России – ростом промышленного производства в годы Великой отечественной войны и послевоенного восстановления страны, а также сейсмичностью и геологическими условиями.

Ключевые слова: локальные территории Сибири (Российская Федерация) и Социалистической Республики Вьетнам, годовые кольца деревьев, дендрогеохимия, сосна обыкновенная, сосна далатская

Благодарности: Исследование проведено на базе Прибайкальского национального парка. Исследование выполнено за счёт грантов РФ (№ 20-67-47005 и 20-67-47021). Обработка данных выполнена в рамках бюджетного проекта Института мониторинга климатических и экологических систем СО РАН (г. Томск).

Для цитирования: Закономерности концентрирования ртути в годовых кольцах деревьев территорий Сибири (Россия) и Республики Вьетнам / Т.Х.Ш. Ле, Н.В. Барановская, Е.Е. Ляпина, М.Г. Крачнакова // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 2. – С. 215–230. DOI: 10.18799/24131830/2025/2/4930

UDC 550.47

DOI: 10.18799/24131830/2025/2/4930

Patterns of mercury concentration in annual tree rings in Siberia (Russia) and the Republic of Vietnam

T.H.S. Le¹, N.V. Baranovskaya^{1✉}, E.E. Lyapina², M.G. Krachnakova¹

¹ National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

² Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, Tomsk, Russian Federation

✉ nata@tpu.ru

Abstract. Relevance. The method of dendrogeochemistry makes it possible to determine the concentration of chemical elements in tree rings. As part of this work, a spatio-temporal reconstruction of mercury pollution of local and regional origin was carried out. **Aim.** Determination of the characteristics of the Hg distribution in space and over a long time in order to identify the main factors affecting Hg accumulation by annual rings of pine, as well as the establishment and clarification of patterns in Hg accumulation in each study area. The object of the study is the core of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) (Tomsk, Irkutsk regions, Republic of Buryatia) and dalat pine (*Pinus dalatensis* Ferré) (Socialist Republic of Vietnam). **Methods.** Ten cores were selected for the study in the years range from 1930 to 2022. The sampling was carried out using the Haglof age drill. The number and width of annual rings are determined with an accuracy of 0.001 mm on the LINTAB device at the Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS (Tomsk). Mercury analysis was conducted on the mercury analyzer RA-915+ by atomic absorption (pyrolysis method) on the basis of the Engineering School of Natural Resources of Tomsk Polytechnic University. **Results and conclusions.** Hg accumulation by the wood of Scots pine and Dalate pine in the studied territories is affected by natural and anthropogenic factors: natural emanations of Hg due to the degassing of the Earth's crust (Irkutsk Region and the Republic of Buryatia); local technogenesis (Tomsk Region), as well as military actions using chemical weapons (Republic of Vietnam). The study assessed the dynamics of Hg accumulation by wood over 93 years (1930–2021/2023). In the period from 1930 to the end of the 1960s there is an increased average content of the element in all the studied territories. The increased concentrations of Hg in this period on the territory of the Republic of Vietnam related to the transboundary transport of mercury from the continental part of East Asia, as well as chemical weapons used during the wars; on the territory of Russia – the growth of industrial production during the Great Patriotic War and the post-war reconstruction of the country, as well as seismicity and geological conditions.

Keywords: local territories of Siberia (Russian Federation) and the Socialist Republic of Vietnam, tree rings, dendrogeochemistry, Scots pine, *Pinus dalatensis* Ferré

Acknowledgements: The study was conducted at the Pribaikalsky National Park. The research was carried out using the RSF grants (no. 20-67-47005 and 20-67-47021). The data processing was carried out within the framework of the budgetary project of Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Tomsk).

For citation: Le T.H.S., Baranovskaya N.V., Lyapina E.E., Krachnakova M.G. Patterns of mercury concentration in annual tree rings in Siberia (Russia) and the Republic of Vietnam. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 2, pp. 215–230. DOI: 10.18799/24131830/2025/2/4930

Введение

В настоящее время загрязнение окружающей среды увеличивается прямо пропорционально человеческой деятельности. Повышенные концентрации химических веществ в компонентах окружающей среды имеют двойную природу: естественный геохимический фон и антропогенное воздействие. В результате антропогенной деятельности, воздействие которой сохраняется в течение длительного времени, меняется химический состав и уровень накопления химических веществ в компонентах окружающей среды.

Одним из наиболее эффективных и экономичных методов мониторинга являются биологические индикаторы. В настоящее время для мониторинга качества окружающей среды используется множество биологических индикаторов, таких как кольца и листья деревьев, мхи, лишайники, хвоя, кораллы, а также шерсть животных и др. [1–8]. Для анализа динамики загрязнения окружающей среды широко применяются годовые кольца сосны, что обусловлено широким ареалом ее распространения и простотой датировки годовых колец.

Методы дендрохронологии и дендрохимии используются для оценки различных факторов,

влияющих на качество окружающей среды, и позволяют проводить реконструкцию исторических событий и загрязнений окружающей среды в природных компонентах [9]. Ртуть является глобально токсичным элементом. Уделяется всё больше внимания содержанию ртути в окружающей среде. Газообразная ртуть является одной из наиболее распространенных её форм, составляя более 95 % от общего количества её эмиссии. Данная форма ртути может переноситься на дальние расстояния из-за относительно длительного времени нахождения паров ртути в атмосферном воздухе (от пяти месяцев до двух лет), а затем выпадать на подстилающую поверхность в результате влажного и сухого осаждения [10]. Растительность играет важную роль в биогеохимическом цикле Hg, который представлен тремя механизмами ассимиляции Hg: через корни, листву и кору [11].

В 1975 г. N.W. Lepp провел краткий обзор путей поглощения и факторов, регулирующих поступление металлов в растения. В гипотезе В.Е. Cutter and R.P. Guyette и S.A. Watmough показано, что в области дендрохимии химический состав кольца дерева отражает часть химического компонента окружающей среды [11–13]. На накопление элементов в годовом кольце влияют не только условия окружающей среды, но и физиологические процессы в самом дереве [14, 15]. В настоящее время учёные уделяют особое внимание использованию древесины, хвои деревьев, лишайников в качестве биоиндикаторов для пространственного и временного мониторинга концентраций загрязняющих веществ [4–6].

Предыдущие литературные исследования показали, что при последовательном формировании химического состава годовых колец они фиксируют информацию об изменениях в биосфере за длительный период времени [10, 16, 17]. Однако воз-

можно перераспределение элементов между годовыми кольцами, которое в значительной степени зависит от путей поглощения и подвижности химических элементов в тканях растений [18].

Ртуть поступает в древесину деревьев в результате естественных процессов (дегазация земной коры и геологические особенности территорий) или в результате антропогенной деятельности (рис. 1, а). Данные о содержании ртути в годовых кольцах деревьев могут быть использованы для создания глобальной карты распределения ртути, что внесёт вклад в архив данных. Для прогнозирования будущих изменений в цикле ртути в лесных экосистемах необходимо более глубокое понимание механизмов поступления и трансформации ртути в древесных растениях.

В литературе описаны такие пути поступления ртути в годовые кольца деревьев, как: поглощение из почвы корнями; поглощение из воздуха листвой и транслокация через флоэму в кольцо; перенос через кору [11]. В настоящее время исследователи в основном согласны с тем, что ртуть в годовые кольца деревьев поступает из атмосферного воздуха [3, 10, 17, 18, 24].

В последнее время был проведен ряд исследований на предмет динамики накопления ртути годовыми кольцами (рис. 1, б) [1, 3–10, 17, 18, 23, 25]. В качестве природных источников Hg можно назвать вулканическую деятельность, эрозию, дегазацию земной коры [1, 4, 5, 26], а также поступление в результате землетрясений, ураганов и наводнений [27, 28].

Антропогенные выбросы Hg в окружающую среду связаны с металлургической, химической промышленностью, сжиганием твёрдых бытовых и биомедицинских отходов, электронной, бумажной, фармацевтической промышленностью и сжиганием углеводородов.

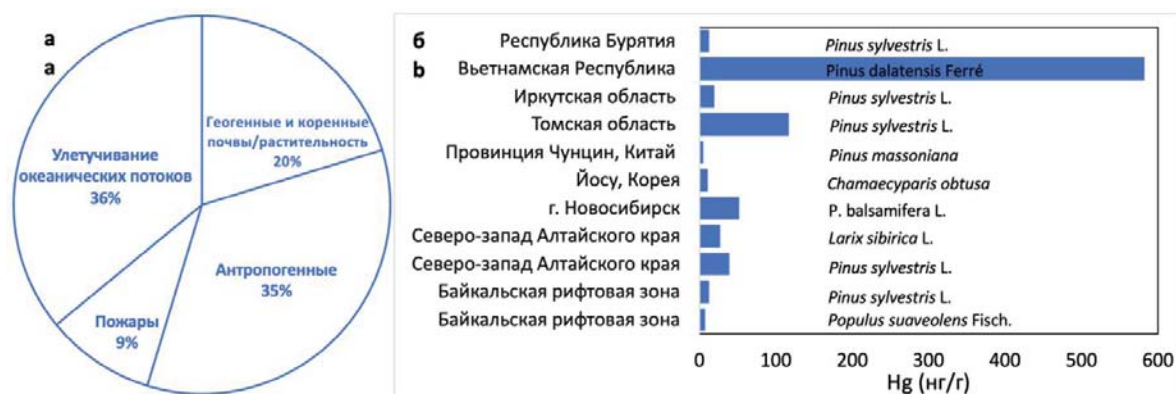


Рис. 1. Соотношение вклада основных источников в глобальную эмиссию ртути: а) [19–22]; б) концентрации Hg в годовых кольцах разных видов сосны в различных районах исследования [3, 5, 7, 10, 23]

Fig. 1. Ratio of the contribution of the main sources to global mercury emissions: а) [19–22]; б) concentrations of Hg in annual rings of different pine species in different study areas [3, 5, 7, 10, 23]

На основе анализа керна деревьев было установлено, что содержание ртути в годовых кольцах деревьев зависит от расстояния между точкой отбора проб и источником выбросов [3, 29].

Обзор научных работ, в которых были систематизированы данные о распространении и возможном источнике эмиссии ртути, связанной с твёрдыми аэрозолями в различных регионах, таких как Северная Америка, Европейский союз и страны Азии (Китай, Япония, Южная Корея, Турция, Израиль, Индия и Непал), даёт представление о содержании Hg в атмосфере. Концентрации Hg в северном полушарии примерно на порядок выше, чем в южном, и её распределение тесно коррелирует с исходными регионами и транспортными путями [30]. Большая часть промышленных предприятий расположена в северном полушарии, что приводит к преобладанию выбросов ртути в данном регионе. Китай, Индия, Соединенные Штаты, Япония и Южная Корея – страны, характеризующиеся быстрой индустриализацией и повышенными концентрациями ртути в компонентах окружающей среды [31].

Глобальное загрязнение ртутью можно связать с четырьмя основными источниками: антропогенная деятельность (2220 т/год) [19], пожары (600 т/год) [20–22], поверхностная геобиоактивность, испарения из почвы и растительности (1300 т/год) [20, 22], а также испарение с поверхности мирового океана (2300 т/год) [20, 22]. Статистические данные показывают, что растительность поглощает примерно четверть общего количества Hg в глобальной атмосфере, что составляет от 4400 до 5300 т/год [24].

Объекты и методика исследования

Объектом исследования выбраны два вида сосны. Сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.), отобранная на территории России (Томская и Иркутская области и Республика Бурятия). Этот вид имеет обширный ареал распространения на Евразийском материке: от Атлантического океана на западе до Тихого океана на востоке, от Заполярья на севере до Черноморского побережья на юге. В России сосна обыкновенная распространена по всей территории. Сосна далатская, или пятиигольчатая сосна (*Pinus dalatensis* Ferré), произрастающая в высоко-

горных районах Лаоса и Вьетнама на высоте от 600 до 2600 м над уровнем моря, является эндемиком Вьетнама. На протяжении десятилетий ареал обитания этого вида сокращается вследствие индустриализации и урбанизации [32]. В связи с этим Международный союз охраны природы предложил включить далатскую сосну в список приоритетных видов для сохранения [33].

Данные виды сосен, произрастают в разных географических регионах, каждый из которых характеризуется различными климатическими и геологическими условиями. Тем не менее оба вида обладают чётко и хорошо различимыми границами годовых колец (рис. 2). Значительное количество предыдущих исследований продемонстрировало эффективность использования видов сосны для решения задач в области дендрохронологии и дендрогеохимии [1, 5, 7, 16, 32, 34, 35].

В период с 2021 по 2023 гг. были отобраны образцы кернов деревьев в конце вегетационного периода в трёх регионах России (Томской, Иркутской областях и Республике Бурятия) и в двух регионах центрального нагорья Социалистической Республики Вьетнам (г. Далат и провинции Даклак). Выбор мест отбора проб проводился с учетом расположения промышленных объектов. В районах, где поток Hg зависит от естественных процессов, таких как сейсмическая активность, точки отбора проб располагаются вдоль и вкрест простирания разломов рифтовой зоны.

Томская, Иркутская области и Республика Бурятия представляют собой три крупных региона Сибири. На территории Томской области были найдены россыпные месторождения золота в долинах рек. Однако при разведке коренных месторождений золота типичные примеси ртути (0,12–0,6 %) были обнаружены на правом берегу нижнего течения р. Тугояковки, в среднем и верхнем течении рек Ушайки и Киргизки, а также в районе острова Айдаковский р. Томи. Все эти объекты рассматриваются как естественные источники поступления ртути в компоненты окружающей среды, в том числе и в растения.

Территория Томской области считается спокойной в сейсмотектоническом отношении.



Рис. 2. Фотография возрастного керна сосны далатской (*Pinus dalatensis* Ferré) (а) и сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) из Томской области (б) (справа – кора; слева – сердцевина)

Fig. 2. Photo of an age core of *Pinus dalatensis* Ferré (а) and Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) from the Tomsk Region (б) (bark is on the right; heartwood is on the left)

Однако наблюдаются техногенные землетрясения с промышленными взрывами разного назначения (сила толчка достигала 3–4 баллов) [36]. Также были установлены обширные ореолы с повышенным содержанием ртути в компонентах окружающей среды (почвы, твердый осадок снега, годовые кольца деревьев, биосубстраты человека) на территории Сибирского промышленного узла (г. Томск) [2, 9, 16, 37–42].

Как известно, Иркутская область и Республика Бурятия расположены на стыке двух тектонических образований от южной части Сибирской платформы до Байкальской рифтовой зоны, что создает сильную сейсмическую активность и землетрясения, которые являются природным источником эманации ртути [43, 44]. В акватории озера Байкал часто происходят землетрясения высокой интенсивности. По статистическим данным в мае 1981 г. произошло сильное землетрясение ($K=14,0$, $M=5,4$), с июня по ноябрь 2022 г. зафиксировано шесть землетрясений ($K=9,5–14,2$) с эпицентрами в 5 км друг от друга и также землетрясения с меньшей интенсивностью ($K=4$) в населённом пункте Тунка [45].

С 1970-х гг. в Иркутской области были размещены ведущие промышленные комплексы России, включая тепловые электростанции, металлургические предприятия, химическую и целлюлозно-бумажную промышленности. Вследствие чего сформировалась техногенная зона ртутного загрязнения [46]. Высокие уровни содержания Hg были отмечены в разных природных объектах Иркутской области [47].

Наибольший вклад в суммарные выбросы Hg на территории Республики Бурятия вносят предприятия теплоэнергетики (ТЭЦ-1, ТЭЦ-2), котельные (доля угля составляет 75–85 %), авиастроение, печное отопление, выбросы автотранспорта, чёрная и цветная металлургия, добыча золота, коксохимическое производство, производство цемента, извести и целлюлозно-бумажная промышленность [48].

Город Далат расположен в центральном нагорье в южно-центральной части Вьетнама, на плато Лангбианг. Экономика территории характеризуется в основном туризмом, сельским хозяйством (выращивание цветов, кофе и чая), где отсутствуют крупная промышленная деятельность и потенциальные источники выбросов ртути. Во Вьетнаме основными источниками ртути, вносящими вклад в глобальный биогеохимический цикл, являются сжигание ископаемого топлива и кустарная золотодобыча. Кроме того, зафиксирован трансграничный перенос ртути с Восточно-Азиатского континента в районы, расположенные ниже по морскому течению, такие как Япония, Тайвань и северная часть Восточного моря [49]. Однако потоки ртути из Во-

сточной Азии изучаются в основном в регионах с умеренным климатом, поэтому необходимо больше данных для сравнительного анализа в тропических регионах, таких как Вьетнам [50]. Последние исследования показывают, что присутствие ртути в воздушных массах из Китая может значительно превышать уровни содержания связанной с PM_{2.5} и газообразной элементарной ртути в Хошимине [50–52].

Для проверки предположений предыдущих исследований о главных факторах потоках поступления Hg в годовые кольца на каждой территории нами были созданы схематические карты отбора проб. Иркутская область и Республики Бурятия характеризуется природными [1, 4, 5]; Томская область – антропогенными источниками [6, 38]. Республика Вьетнам относится к развивающимся странам, экономическое развитие которой началось только после окончания войны с 80-х гг. прошлого века. Схема отбора проб составлена с учетом расположения относительно источников антропогенного воздействия, хроники военных действий, а также влияния трансграничного переноса экотоксикантов в подветренные регионы [49, 50, 52].

В Томском районе выбраны четыре точки отбора проб, которые находятся под воздействием крупнейшего промышленного центра Томской области – северного промышленного узла (рис. 2). Две точки расположены в ближней зоне: в непосредственной близости от исследовательского ядерного реактора Томского Политехнического университета («Реактор») и ООО «Томскнефтехим» («Нефтехим»). Другие две точки находятся с противоположной стороны от города: в населённом пункте Пашино («Пашино») и мкр. Тимирязево («Тимирязево») [8].

В Иркутской области и Республике Бурятия точки выбраны в удалённых районах за пределами городов, в зоне эпицентров землетрясений высокой интенсивности (Байкальская рифтовая зона) (рис. 2). На территории Иркутской области выбраны две точки: кордон Харгино («Харгино») на территории Прибайкальского национального парка, а также вблизи посёлка Песчаное («Песчанка») на острове Ольхон. На территории Республики Бурятия керны сосны отобраны рядом с р. Жохой (база «Снежный барс» Тункинского района («Тунка»)).

В Республике Вьетнам принцип выбора точек отбора проб обусловлен историей техногенного воздействия на природную среду (рис. 3). В рамках данного исследования были выбраны две локации на юго-востоке города Далат, где с 1930 г. активно функционировали чайные плантации и лесопильные предприятия. Также во внимание оказалась единственная железнодорожная линия, связывающая г. Далат с г. Тхапчам в провинции Ниньтхуан в военный период

с 1932 по 1972 гг. На сегодняшний день в юго-восточном регионе республики расположены зоны сельскохозяйственного производства и предприятия по переработке сельскохозяйственной продукции, в то время как в других районах в основном развивается туризм. Кроме того, контрольная проба отобрана в провинции Даклак, которая расположена в 250 км к северу от центра г. Далат. На данной территории отсутствует промышленное воздействие на окружающую среду, что позволяет оценить глобальный уровень выпадения Hg.

Древесный керн извлекался с помощью возрастного бурава, согласно установленным рекомендациям [53], из двух рядом стоящих деревьев примерно одинакового возраста, высоты дерева и диаметра ствола. Всего было отобрано и изучено 10 древесных кернов. Извлечённые керны помещались в бумажные пеналы с указанием номера точки, времени и места отбора. Процесс пробоподготовки включал в себя: высушивание кернов при

комнатной температуре до постоянной массы, размещение в деревянных пеналах. Годовые кольца были разделены по годам, согласно [53], и проанализированы. Измерение ширины годового кольца выполнено с точностью до 0,01 мм с помощью прибора LINTAB с программным обеспечением TSAP-Win в лаборатории динамики и устойчивости экосистем в Институте мониторинга климатических и экологических систем СО РАН (г. Томск).

Измерение содержания Hg в кольцах деревьев проводилось атомно-абсорбционным методом на анализаторе ртути РА-915+ с приставкой ПИРО-915 (предел обнаружения Hg – 5 нг/г, точность определения – 5 нг/г, концентрации элемента рассчитаны на 1 г сухого вещества) в учебно-научной лаборатории на базе Инженерной школы природных ресурсов Томского политехнического университета. Биологическая матрица пробы разлагалась методом пиролиза при температуре 580 °С. Всего проанализировано 830 проб.

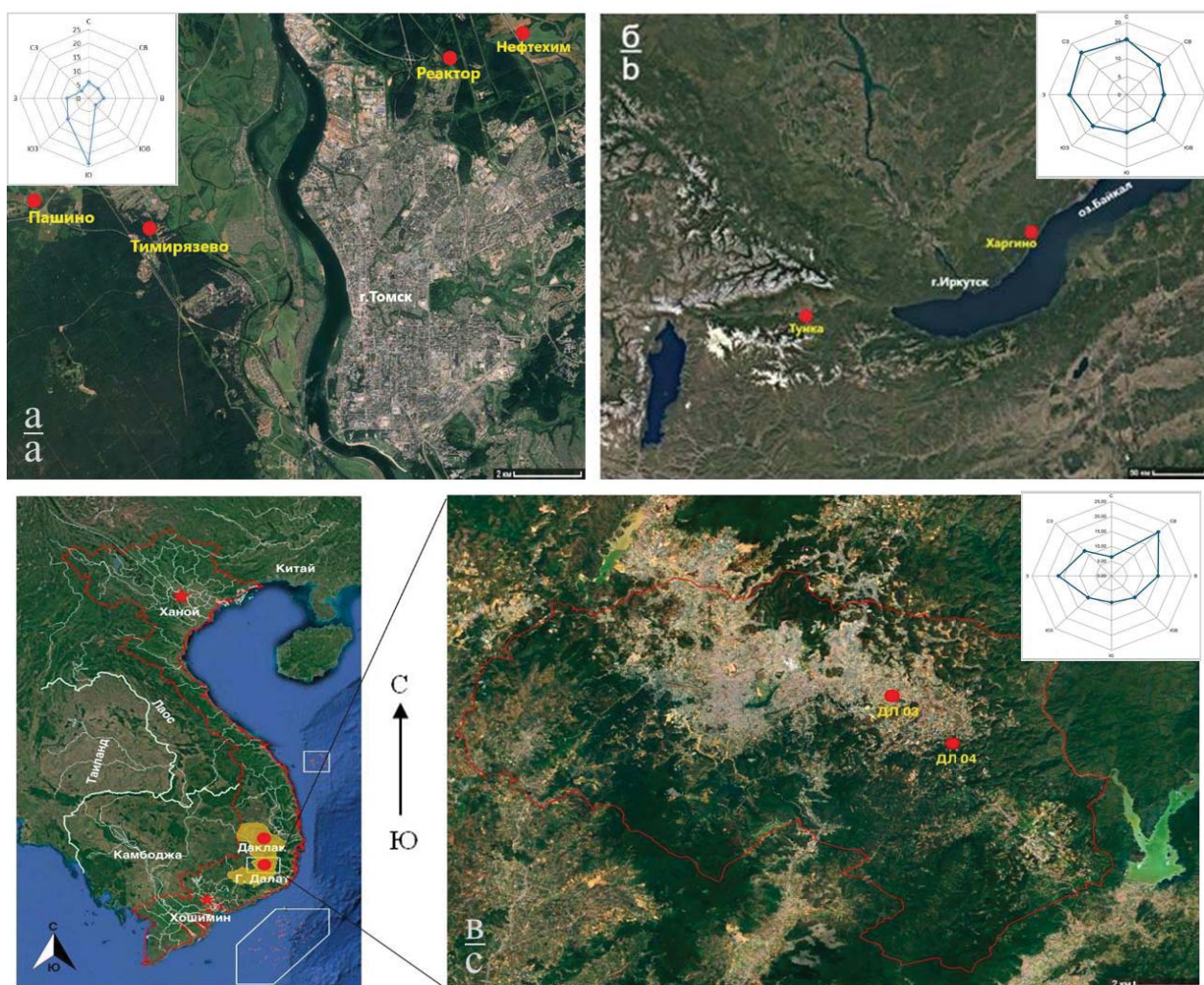


Рис. 3. Карта-схема размещения точек отбора проб: а) Томская область; б) Иркутская область и Республика Бурятия; в) г. Далат

Fig. 3. Map-scheme of the sampling points location: a) Tomsk region; б) Irkutsk region and the Republic of Buryatia; c) c. Dalat

В рамках исследования был проведён анализ содержания ртути в кернах на рассматриваемых территориях за период с 1930 по 2023 гг. Продолжительность временного ряда варьировалась от 80 до 93-х лет. Для удобства предоставления полученных данных концентрации ртути приведены с усреднением за 10 лет: 1930–1939, 1940–1949, 1950–1959, 1960–1969, 1970–1979, 1980–1989, 1990–1999, 2000–2009, 2010–2019 и 2020–2023.

Все статистические анализы и графические представления выполнены с помощью программного пакета Microsoft Excel. Методы пакета Statistica использованы для выявления связи содержания Hg в зависимости от территориальной принадлежности.

Результаты исследования и их обсуждение

Распределение концентраций Hg в древесных кернах исследованных территорий и отдельных сосен крайне неравномерно, что подтверждается результатами расчета коэффициента вариации (73–331 %). Средние содержания Hg характеризуются широким размахом и значительно различаются между регионами: Иркутская область – $20 \pm 1,6$ нг/г, Республика Бурятия – $13 \pm 2,7$ нг/г, Республика Вьетнам – 582 ± 180 нг/г, Томская область – 118 ± 36 нг/г (табл. 1). Следует отметить, что годовые кольца сосны Вьетнама и Томской области выделяются повышенными значениями (табл. 1).

Концентрации Hg в Республике Вьетнам находятся в пределах 5–11510 нг/г. Максимальными

содержаниями Hg характеризуются две точки г. Далат, где содержание Hg в годовых кольцах сосны фиксируется свыше 870 нг/г. Минимальное содержание Hg отмечается в точке, расположенной в 280 км к юго-западу от центра г. Далат.

На территории Томской области концентрации Hg колеблются в пределах 5–3986 нг/г, максимальное содержание наблюдается в точке «Нефтехим», минимальное – в точке «Реактор».

На территории Иркутской области концентрации Hg меняются в пределах 5–100 нг/г. Максимальное содержание Hg отмечается в точке «Песчанка», и минимальное – в точке «Харгино». Точки, расположенные в Республике Бурятия, характеризуются содержанием элемента в пределах от 2–101 нг/г, в кернах точки «Тунка» средние содержания ртути равны $13,0 \pm 2,7$ нг/г.

Расхождение в средних содержаниях Hg в древесине сосны, отобранной на территории Вьетнама и России, может быть связано с особенностями промышленной нагрузки, естественными геохимическими условиями, а также климатом (тропический и умеренный, соответственно).

Изучение характера накопления ртути на каждой из территорий мы объясняем с точки зрения геоэкологической обстановки, формирующейся в ходе исторического развития. Из рис. 4 следует, что поступление Hg в кернах сосны Томской области достигло своего пика в 1940–1949 гг., за исключением точки «Реактор».

Таблица 1. Сравнительная характеристика содержаний Hg (нг/г) в годовых кольцах деревьев исследуемых территорий

Table 1. Compared statistics of Hg concentrations (ng/g) in annual tree rings in different study areas

Точка Point		Возраст, лет Age, years	Среднее Mean	мин-макс медиана min-max median	Стандартное отклонение Standard deviation	Коэффициент вариации Variation coefficient
Томская область Tomsk Region	Тимирязево Timiryazev	80	133,7±23,9	5–1170 47,0	214,7	161
	Пашино Pashino	80	127,6±47,2	5–3505 17,7	424,5	332
	Реактор Reactor	93	67,3±21,6	5–1953 27,0	207,9	309
	Нефтехим Neftekhim	81	146,1±51,2	5–3986 29,0	463,4	317
Республика Бурятия Republic of Buryatia	Тунка Tunka	93	12,6±2,7	5–101 7,3	16,7	132
Иркутская область Irkutsk Region	Песчанка Peschanka	87	26,2±2,1	5–100 21,1	19,3	73
	Харгино Khargino	93	13,3±1,1	5–67 10,5	10,5	80
Вьетнам Vietnam	Даклак Daklak	93	12,4±1,1	5–65 10	10,9	88
	ДЛОЗ DL03	93	882,9±207,1	5–11380 12,3	2017,4	227
	ДЛО4 DL04	82	876,4±272,9	5–11510 6,7	2471,5	282

Накануне Великой Отечественной войны (1941–1945 гг.) промышленный сектор Томской области оставался слабо развитым и включал в себя такие отрасли, как производство строительных материалов, пищевая, лесная и деревообрабатывающая промышленности. На начальном этапе войны в Томской области была проведена конверсия производства для обеспечения фронта предметами первой необходимости и вооружением. Вследствие чего из европейской части страны в Томск было эвакуировано более 30 промышленных предприятий, и уже к концу 1941 г. половина эвакуированных предприятий начала выпускать продукцию [54].

В интервале 1940–1949 гг. объем производства продукции вырос во всех отраслях, кроме пищевой промышленности. В послевоенные 1950–1959 гг. основными отраслями промышленности были машиностроение и металлообработка, лесная, деревообрабатывающая и пищевая, на долю которых приходилось 59,2, 15,6 и 10,1 % соответственно. С 1940 по 1960 гг. работала железнодорожная линия Асино–Томск–Тайга, связывавшая областную столицу с тремя соседними административными районами [54].

Интересно отметить, что керн сосны в точке «Реактор» является самым «старым» из четырех собранных образцов. Максимальное содержание Hg в точке «Реактор» отмечено в период 1930–1939 гг. со средним содержанием 308 нг/г.

Как свидетельствуют данные табл. 1, выявлено заметное несоответствие амплитуды среднего содержания в одном из районов Иркутской области по сравнению с двумя другими районами. Как в точке «Песчанка», так и в точке «Харгино» содержание Hg было относительно равномерным во все периоды. Однако в период с 1940 по 1989 гг. содержание ртути заметно увеличилось и достигло 37 и 16 нг/г, соответственно. Тенденция локальных эмиссий Hg характеризуется местными факторами, связанными с региональной сейсмической активностью, антропогенной деятельностью. Во время Великой Отечественной войны промышленность Западной Сибири была ориентирована на мощное развитие. В районе озера Байкал были построены крупные заводы, но после распада Советского Союза развитие затормозилось [54, 55]. В точке «Тунка» поступление ртути в керн сосны имеет идентичный тренд в период с 1940 по 1949 гг., который отмечается максимальным всплеском содержания ртути, наблюдаемый в керне сосны Томской области и Республике Вьетнам.

Пиковые значения содержания элемента в юго-западном Прибайкалье совпадают также с датами сильных землетрясений (рис. 5): 1912 (M=5,3), 1924 (M=4,9), 1926 (M=4,8), 1928 (M=5), 1950 (M=7), 1956 (M=4,5; 5), 1975 (M=8,1); 1959 (M=9); 1963 (M=4,5), 1967 (M=7,8); 1973 (M=4,5), 1980 (M=4,5), 1981

(M=5), 1982 (M=4,1–4,6), 1986 (M=4,1), 1988 (M=4,1), 1989 (M=4,7), 1994 (M=6,5); 1995 (M=5,9), 1999 (M=6), 2008 (M=6,3), 2014 (M=6), 2019 (M=6), 2021 (M=6,7).

Поток ртути в годовые кольца сосны в Центральном нагорье Вьетнама имеет максимальные концентрации в период 1940–1969 гг. До 1940 г. было завершено строительство инфраструктуры, включая электростанцию (1927 г.), дороги, соединяющие город Далат с соседними районами (1937 г.), железнодорожный вокзал Далат (1938 г.), университет Далат (1939 г.). Кроме того, в этот период население города заметно увеличилось, в основном за счет притока рабочих и туристов. Если в 1923 г. население составляло 1500 человек, то к 1940 г. оно достигло 11500 человек. Кроме этого, геохимические условия местности и проявления рудного золота, сопровождаемые примесями Ag, Pb-Zn, Cu и As, также могут способствовать синхронизации поступления Hg в атмосферу [56].

На рис. 6 (ДЛ03, ДЛ04) показана корреляция между динамикой содержания ртути в сосновых кернах и историческим периодом войны за защиту Отечества против японского империализма (1940–1945 гг.), Первой Индокитайской войны против Французского колониализма (1946–1954 гг.) и Второй Индокитайской войны против Американского империализма (1955–1975 гг.). Очевидно, что количество пиковых концентраций и периоды их локализации во временном интервале совпадают с хронологией военных конфликтов.

Вторая Индокитайская война удерживает исторический рекорд по самому большому количеству сброшенных бомб. ВВС США использовали 7662000 т взрывчатых веществ, что в 3,7 раза больше по сравнению с общим количеством взрывчатых веществ, использованных всеми странами во время Второй мировой войны (1939–1945 гг.). Во время войны в Юго-Восточной Азии гербициды широко применялись в военных целях, преимущественно для дефолиации густых тропических лесов с целью обнаружения вражеских военных и снабженческих подразделений и в меньшей степени – для уничтожения сельскохозяйственных культур и в различных других целях. Военное применение гербицидов в Южном Вьетнаме началось в 1962 г., значительно расширилось в 1965 и 1966 гг. и достигло пика в 1967–1969 гг. [57].

Возможно, что пик содержания Hg, фиксирующийся на период между 1940 и 1949 гг. и не совпадающий с периодом распыления США токсичных химикатов в Южном Вьетнаме, может объясняться либо глобальными выпадениями, либо внутренним перетоком. Тем не менее возможность переноса химических веществ между кольцами посредством радиальной диффузии остаётся гипотезой, которая пока не получила эмпирического подтверждения.

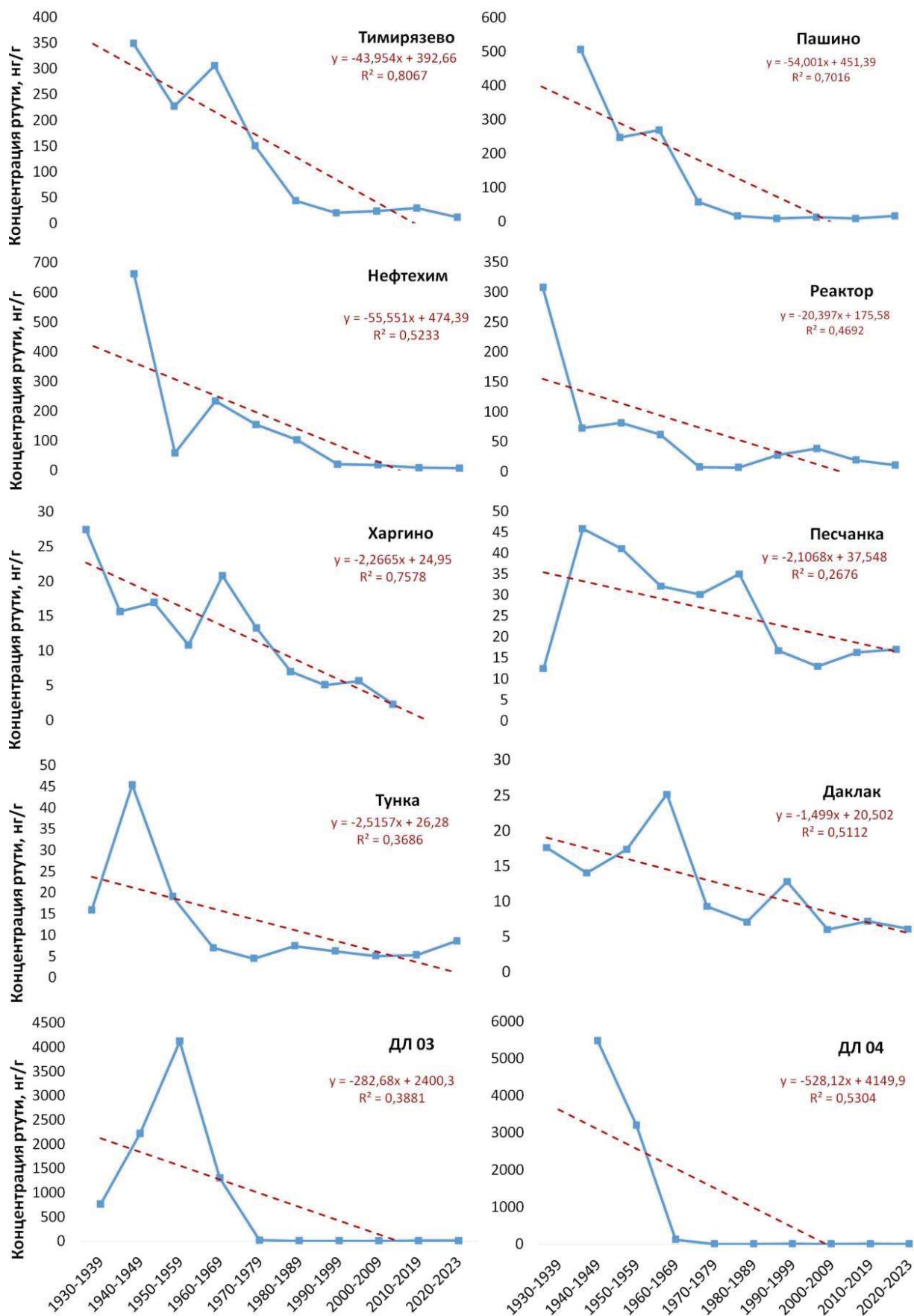


Рис. 4. Динамика хронологии содержания ртути в древесине сосны на территории исследования
 Fig. 4. Dynamics of mercury chronology in pine wood in the study area

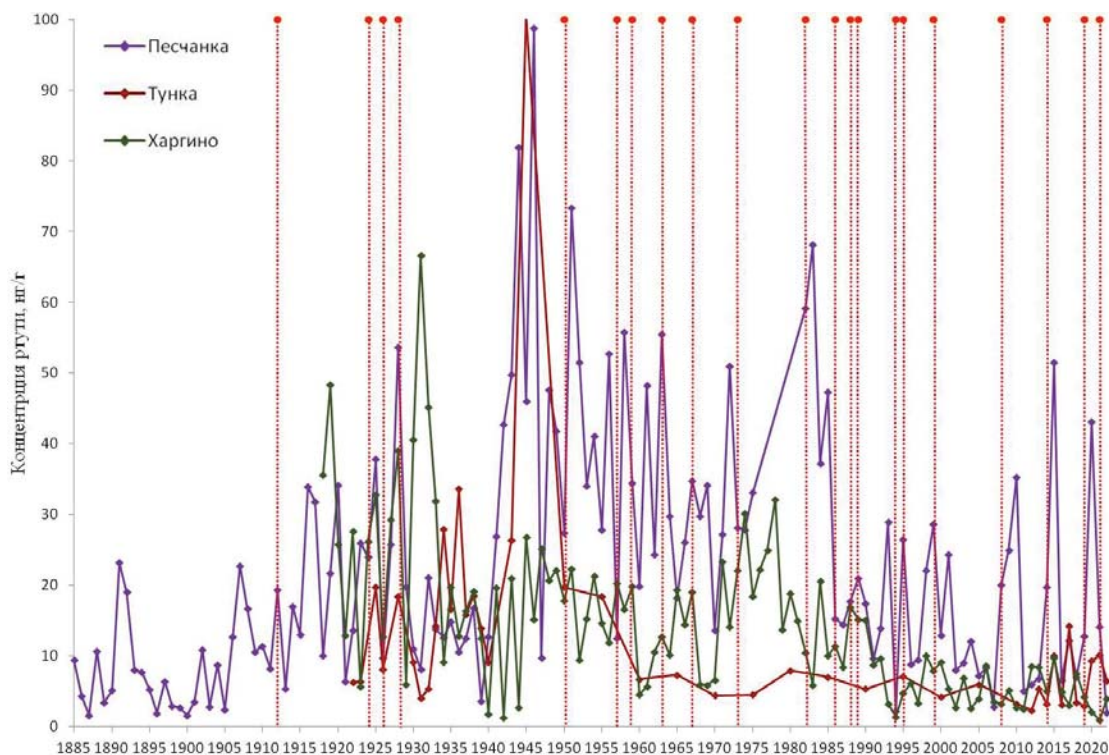


Рис. 5. Концентрация ртути в древесных ядрах на территории Юго-западного Прибайкалья (пунктир – землетрясения с $M > 4,0$)

Fig. 5. Mercury concentration in wood cores in the territory of the South-Western Baikal region (dotted line – earthquakes with $M > 4.0$)

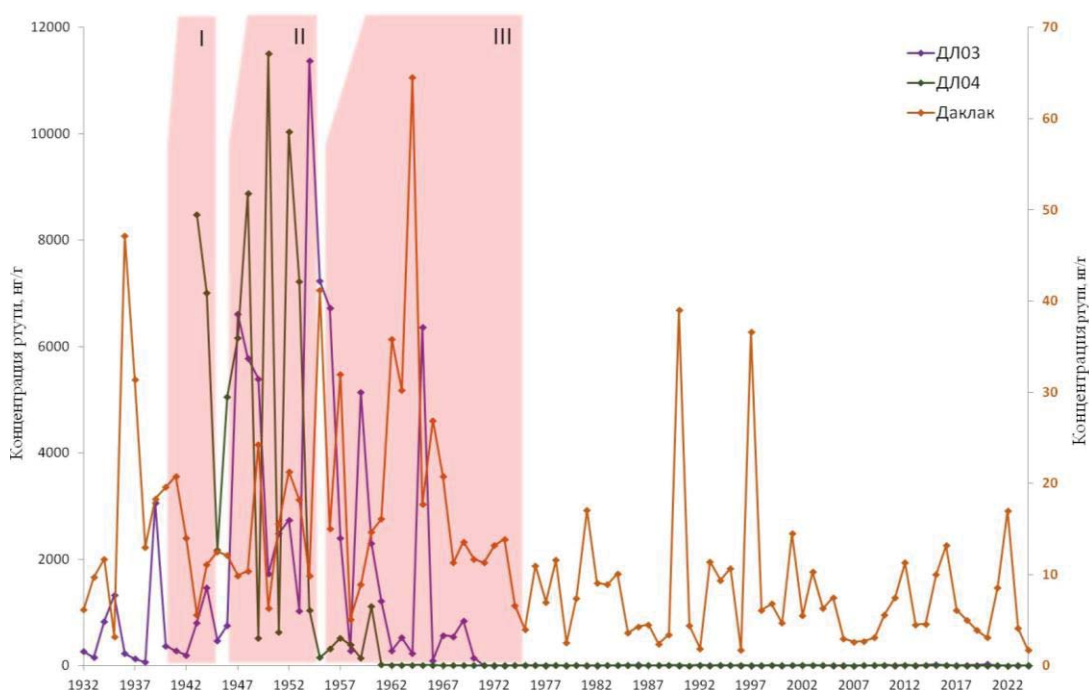


Рис. 6. Концентрация ртути в древесных ядрах на территории Республики Вьетнам: I – война за защиту Отечества против японского империализма (1940–1945 гг.); II – Первая Индокитайская война против Французского колониализма (1946–1954 гг.); III – Вторая Индокитайская война против Американского империализма (1955–1975 гг.)

Fig. 6. Mercury concentration in wood cores in the Republic of Vietnam: I – the War for the Defense of the Fatherland against Japanese imperialism (1940–1945); II – the First Indochina War against French colonialism (1946–1954); III – the Second Indochina War against American imperialism (1955–1975).

Следует отметить, что содержание Hg в кернах сосны на 2-й территории провинции Даклак во Вьетнаме, где диапазон содержания ртути колеблется от 6 до 25 нг/г, соответствует амплитуде колебаний в точке «Харгино» Иркутской области (5–27 нг/г).

На территории Сибири и во Вьетнаме максимальные значения ртути в кольцах приходятся на период 40-х и 60-х гг. XX в. Для данных периодов характерно активное промышленное развитие и наращивание военного производства. В результате исследования можно утверждать, что максимальные всплески на многих территориях отмечаются независимо от геологического фактора. Глобальная эмиссия ртути характерна именно в период 1940–1969 гг. [58, 59].

В результате исследования выявлено, что для большинства территорий, независимо от их особенностей, в период с 1930 по 1969 гг. отмечается максимальный всплеск концентрирования Hg. Сходство распределения Hg во времени заключается в том, что содержание Hg в период 1930–1969 гг. превышает среднее значение за весь исследуемый период во всех четырех районах: примерно в 2,2 раза в Томской области, в 1,5 раз в Республике Бурятия, в 1,3 раза в Иркутской области и в 2,7 раз во Вьетнаме (рис. 5).

Максимальное значение отмечается в керне сосны Вьетнама (1569 нг/г), что превышает содержание в период 1970–2023 гг. (8 нг/г) в 193 раза, и среднее значение за весь исследуемый период (582 нг/г) – в 2,7 раза. Минимальное содержание ртути в интервале 1930–1969 гг. отмечено в Республике Бурятия и в Иркутской области (20 и 25 нг/г, соответственно), что по сравнению с данными после 1970 г. и за весь исследуемый период выше в 3,3 и 1,5 раза, а также в 1,7 и 1,3 раза, соответственно. В Томской области среднее содержание ртути 260 нг/г (1930–1969 гг.), что в 6 раз ниже, чем во Вьетнаме, и в 10 раз выше, чем в Иркутской области. Примечательно, что период с 1930 по 1969 гг. совпадает со значительным ростом научно-технического прогресса.

Для выявления общих закономерностей поступления ртути в древесину сосны использовали корреляционный анализ. Значимость средних концентраций элемента между годами оценивалась с помощью нулевой гипотезы при 5 % уровне надежности. Выявлена связь в накоплении поллютанта древесиной на участках «Пашино»–«Тимирязево» ($r=0,32$; при $P<0,05$) и «Тимирязево»–«Реактор» ($r=0,22$; при $P<0,05$), «ДЛ03»–«ДЛ04» ($r=0,3$; при $P<0,01$), «Тунка»–«Песчанка» ($r=0,35$; при $P<0,01$).

Тенденция накопления Hg в годовых кольцах деревьев за весь период с 1930 по 2021 гг. проиллюстрирована на рис. 4. В данном исследовании была реконструирована история загрязнения и тенденция потока Hg в годовых кольцах деревьев.

Кроме того, для выявления характера изменения концентраций Hg с течением времени применялся линейный регрессионный анализ. Графики линейной регрессии всех изученных точек отбора проб демонстрируют тенденцию к снижению концентраций за весь период исследования.

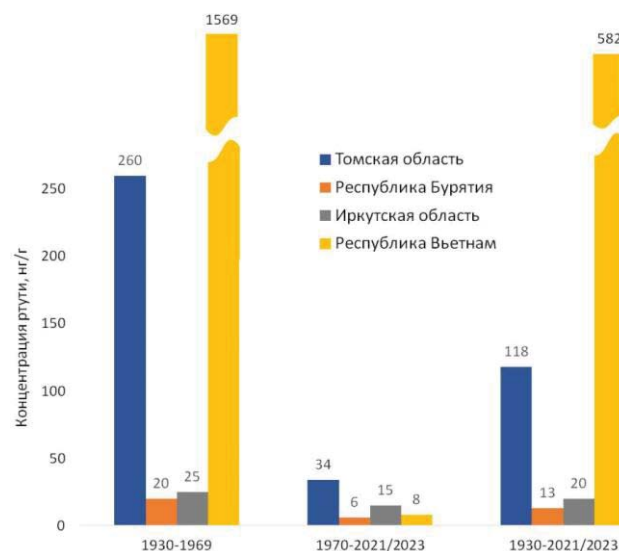


Рис. 7. Периоды накопления ртути древесиной сосны обыкновенной и далатской на исследуемых территориях: 1 – Томская область; 2 – Республика Бурятия; 3 – Иркутская область; 4 – Вьетнам

Fig. 7. Periods of mercury accumulation by Scots pine and Dalat pine cores in different territories: 1 – Tomsk region; 2 – Republic of Buryatia; 3 – Irkutsk region; 4 – Vietnam

Заключение

На аккумуляцию Hg древесиной сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) и сосны далатской (*Pinus dalatensis* Ferré) на исследованных территориях влияние оказывают как природные, так и антропогенные факторы: естественная эманация Hg вследствие дегазации земной коры (Иркутская область и Республика Бурятия); локальный техногенез (Томская область), а также военные действия с применением химического оружия (Республика Вьетнам). В ходе исследования оценена динамика особенностей накопления Hg древесиной на протяжении 93 лет (1930–2021/2023 гг.). В период с 1930-х и до конца 1960-х гг. наблюдаются повышенные средние содержания элемента на всех исследованных территориях. Кратность превышения составляет от 1,7 до 196 раз по сравнению с последующим временным интервалом и от 1,3 до 2,7 раз относительно среднего по выборке. Повышенные концентрации Hg в период 1940–1969 гг. на территории республики Вьетнам обусловлены трансграничным переносом ртути из континентальной части Восточной Азии, а

также применявшимся в ходе Вьетнамской войны химическим оружием, а на территории России – ростом промышленного производства в годы Великой Отечественной войны и послевоенного восстановления страны. Анализ хронологии ртути в древесине сосны всех исследованных деревьев указывает на

уменьшение уровня содержания Hg с 1970-х гг. до современного периода. Наблюдается вариативность накопления элемента в зависимости от естественно-го геохимического фона, обусловленного сейсмичностью и геологическими условиями, техногенной нагрузкой и др.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Эманации ртути Байкальского рифта по данным изучения годовых колец деревьев (на примере Тункинской впадины) / Л.П. Рихванов, Е.Е. Ляпина, Д.В. Юсупов, Е.М. Турсуналиева, А.А. Павлова // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. – 2021. – Т. 496 – № 1. – С. 30–35. DOI:10.31857/S2686739721010199.
2. Черненькая Е.В. Динамика изменения элементного состава природной среды по данным изучения гербарных и современных сборов растений юга Сибири: дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – Томск, 2016. – 262 с.
3. Poplar tree (*Populus Balsamifera* L.) as indicator of mercury emission from a point source / D.V. Yusupov, E.E. Lyapina, E.M. Tursunaliyeva, N.A. Osipova, N.V. Baranovskaya // Chemosphere. – 2022. – Vol. 287. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2021.132157.
4. Турсуналиева Е. М. Экогеохимия ртути в древесных растениях рода тополь (листьях и годовых кольцах) урбанизированных территорий Сибири и Дальнего Востока : дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – Томск, 2022. – 140 с.
5. Юсупов Д.В. Методология биогеохимической индикации урбанизированных и горнопромышленных территорий на основе анализа древесной растительности: дис. ... д-ра геол.-минерал. наук. – Томск, 2022. – 344 с.
6. Ляпина Е.Е. Экогеохимия ртути в природных средах Томского региона: дис. ... канд. геол.-мин. наук. – Томск, 2012. – 154 с.
7. Ляпина Е.Е. Эколого-геохимические особенности накопления ртути древесиной хвойных растений на территории Алтайского края // Лесотехнический журнал. – 2023. – Т. 13. – № 4 (52). – С. 95–109. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2023.4/19.
8. Дендрохимия Hg по данным изучения сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris*) на территории Томского района / Е.Е. Ляпина, Т.Х.Ш. Ле, М.Г. Крачнакова, Н.В. Барановская, А.Н. Маркелова, С.Ю. Золотов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 8. – С. 125–136. DOI: <https://doi.org/10.18799/24131830/2024/8/4602>
9. Рихванов Л.П., Архангельская Т.А., Замятина Ю.Л. Дендрорадиография как метод ретроспективной оценки радиозоологической ситуации: монография. – Томск: Дельтаплан, 2015. – 148 с.
10. Method to measure tree-ring width, density, elemental composition, and stable carbon and oxygen isotopes using one sample / C. Xu, Y. Zhao, W. An, Q. Zhao, Y. Liu, M. Sano, T. Nakatsuka // Journal of Forestry Research. – 2024. – Vol. 35(1):56. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11676-024-01707-9>.
11. Lepp N.W. The potential of tree-ring analysis for monitoring heavy metal pollution patterns // Environmental Pollution. – 1970. – Vol. 9. – P. 49–61. DOI: 10.1016/0013-9327(75)90055-5.
12. Cutter B.E., Guyette R.P. Anatomical, chemical, and ecological factors affecting tree species choice in dendrochemistry studies // Journal of Environmental Quality. – 1993. – Vol. 22. – P. 611–619. DOI: 10.2134/jeq1993.00472425002200030028x
13. Watmough S.A. Monitoring historical changes in soil and atmospheric trace metal levels by dendrochemical analysis // Environmental Pollution. – 1999. – Vol. 106 (3). – P. 391–403. DOI: 10.1016/s0269-7491(99)00102-5.
14. Watmough S.A., Hutchinson T.C. Historical changes in lead concentrations in tree-rings of sycamore, oak and Scots pine in north-west England // Science of the Total Environment. – 2002. – Vol. 293. – P. 85–96. DOI: 10.1016/s0048-9697(01)01149-4.
15. Watmough S.A., Hutchinson T.C. Uptake of 207Pb and 111Cd through bark of mature sugar maple, white ash and white pine: a field experiment // Environmental Pollution. – 2003. – Vol. 121 (1). – P. 39–48. DOI: 10.1016/s0269-7491(02)00208-7.
16. Годовые кольца сосны обыкновенной (*Pinus Sylvestris* L.) – индикатор геохимической обстановки и хронологического изменения химического элементного состава окружающей среды / А.С. Миронова, Л.П. Рихванов, Н.В. Барановская, А.Ф. Судыко // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 4. – С. 106–116. DOI: 10.18799/24131830/2020/1/2452.
17. Characterization of mercury concentration from soils to needle and tree rings of Schrenk spruce (*Picea schrenkiana*) of the middle Tianshan Mountains, northwestern China / H. Kang, X. Liu, J. Guo, B. Wang, G. Xu, G. Wu, S. Kang, J. Huang // Ecological Indicators. – 2019. – Vol. 104. – P. 24–31. DOI: 10.1016/j.ecolind.2019.04.066.
18. Arnold J., Gustin M.S., Weisberg P.J. Evidence for nonstomatal uptake of Hg by aspen and translocation of Hg from foliage to tree rings in Austrian Pine // Environmental Science Technology. – 2018. – Vol. 52. – P. 1174–1182. DOI: 10.1021/acs.est.7b04468.
19. United Nations Environment Programme. Chemicals and Health Branch Geneva, 2019. URL: <https://www.unep.org/resources/global-environment-outlook-6> (дата обращения 15.11.2024).
20. A new mechanism for atmospheric mercury redox chemistry: implications for the global mercury budget / H.M. Horowitz, D.J. Jacob, Y. Zhang, T.S. Dibble // Atmospheric Chemistry and Physics. – 2017. – Vol. 17. – P. 6353–6371. DOI: 10.5194/acp-17-6353-2017.
21. Mercury from wildfires: global emission inventories and sensitivity to 2000–2050 global change / A. Kumar, W. Shiliang, Y. Huang, L. Hong, J.O. Kaplan // Atmospheric Environment. – 2018. – Vol. 173. – P. 6–15. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.10.061>.
22. Updated global and oceanic mercury budgets for the United Nations global mercury assessment / P.M. Outridge, R.P. Mason, F. Wang, S. Guerrero, L.E. Heimbürger-Boavida // Environmental Science & Technology. – 2018. – Vol. 52. – P. 11466–11477. DOI: 10.1021/acs.est.8b01246.

23. Ahn Y.S., Jung R., Moon J.H. Approaches to understand historical changes of mercury in tree rings of Japanese Cypress in industrial areas // *Forests*. – 2020. – Vol. 11 (8). – P. 800. DOI: <https://doi.org/10.3390/f11080800>.
24. Vegetation uptake of mercury and impacts on global cycling / J. Zhou, D. Obrist, A. Dastoor, M. Jiskra, A.B. Ryzhkov // *Nature Reviews Earth & Environment*. – 2021. – Vol. 2 (4) – P. 1–16. DOI: <https://doi.org/10.1038/s43017-021-00146-y>
25. Tatzber M., Fürst A. Mercury in tree rings close to emission sources in Austria // *Environmental Science and Pollution Research*. – 2023. – Vol. 30 (8). – P. 86084–86096. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-023-28251-z>.
26. Terrestrial mercury and methylmercury bioaccumulation and trophic transfer in subtropical urban forest food webs / F. Zhang, Z. Xu, X. Xu, L. Liang, Z. Chen, X. Dong, K. Luo, F. Dinis, G. Qiu // *Chemosphere*. – 2022. – Vol. 299. – P. 134424. DOI: [10.1016/j.chemosphere.2022.134424](https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.134424).
27. Добровольский В.В. Основы биогеохимии. – М.: Академия, 2003. – 400 с.
28. Лунина О.В., Гладков А.С., Гладков А.А. Систематизация активных разломов для оценки сейсмической опасности // *Тихоокеанский геология*. – 2012. – Т. 31. – № 1. – С. 49–60.
29. Ртуть в листьях тополя на урбанизированных территориях Юга Сибири и Дальнего Востока / Д.В. Юсупов, Л.П. Рихванов, Ю.В. Робертус, Е.Е. Ляпина, Е.М. Турсуналиева, Н.В. Барановская, Н.А. Осипова // *Экология и промышленность России*. – 2018. – Т. 22. – № 12. – С. 56–62. DOI: [10.18412/1816-0395-2018-12-56-62](https://doi.org/10.18412/1816-0395-2018-12-56-62).
30. Машьянов Н.Р. Проблемы экологической безопасности // *Токсичные металлы, "Минерал"*. – 1999. – № 1. – С. 5–64.
31. Measurements and distribution of atmospheric particulate-bound mercury: a review / H. Zhang, X.W. Fu, X. Wang, X.B. Feng // *Bull Environ Contam Toxicol*. – 2019. – Vol. 103. – P. 48–54. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00128-019-02663-5>.
32. Individual tree diameter growth modeling system for Dalat pine (*Pinus dalatensis* Ferré) of the upland mixed tropical forests / B. Huy, L.C. Nam, K.P. Poudel, H. Temesgen // *Forest Ecology and Management*. – 2020. – Vol. 480. – P. 1–15. DOI: [10.1016/j.foreco.2020.118612](https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118612).
33. IUCN, 2019. The IUCN Red list of Threatened Species. URL: <https://www.iucnredlist.org/> (дата обращения 01.12.2024).
34. Contrasting tree ring Hg records in two conifer species: Multi-site evidence of species-specific radial translocation effects in Scots pine versus European larch / T. Novakova, T. Navratil, J.D. Demers, M. Roll, J. Rohovec // *The Science of The Total Environment*. – 2021. – Vol. 762. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144022>.
35. Świątek B., Kraj W., Pietrzykowski M. Adaptation of *Betula pendula* Roth., *Pinus sylvestris* L., and *Larix decidua* Mill. to environmental stress caused by tailings waste highly contaminated by trace elements // *Environmental Monitoring and Assessment*. – 2024. – Vol. 196. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10661-023-12134-4>.
36. Евсеева Н.С. География Томской области. (Природные условия и ресурсы). – Томск: Изд-во Томского университета, 2001. – 223 с.
37. Реконструкция радиационной обстановки на территории Томской области по стратифицированным природным образованиям / Л.П. Рихванов, Ю.Л. Замятина, А.М. Межибор, Т.А. Архангельская, А.Ю. Иванов // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2011. – Т. 319. – № 1. – С. 199–203.
38. Таловская А.В. Экогеохимия атмосферных аэрозолей на урбанизированных территориях юга Сибири: дис. ... д-ра геол.-минерал. наук. – Томск, 2022. – 170 с.
39. Язиков Е.Г. Разработка методологии комплексной эколого-геохимической оценки состояния природной среды (на примере объектов юга Западной Сибири) // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2001. – Т. 304. – № 1. – С. 325–336.
40. Экология Северного промышленного узла г. Томска. Проблемы и решения / А.М. Адам, Л.П. Рихванов, С.В. Нарзулаев и др. / под ред. А.М. Адама. – Томск: Изд-во ТГУ, 1994. – 260 с.
41. Летувнинкас А.И., Строителей А.Д., Квасников А.В. Геохимические аспекты состояния природной среды в районе Туганского титан-циркониевого месторождения // Основные проблемы охраны геологической среды (информационные материалы). – Томск: Томский гос. ун-т, 1995. – С. 93–99.
42. Туганское комплексное месторождение в Томской области / А.И. Летувнинкас., В.Г. Бирюков, А.Д. Строителей, Н.С. Москвитина, Н.Ю. Ахмадшин, Т.А. Семина // *Рудные месторождения. Минералогия. Геохимия*. – Томск: Национальный исследовательский Томский государственный университет, 2000. – С. 139–178.
43. Повышенные содержания ртути в воде истока реки Ангара: отклики на геодинамические воздействия и сильные землетрясения / В.И. Гребенщикова, М.И. Кузьмин, А.В. Ключевский, В.М. Демьянович, А.А. Ключевская // *Доклады российской академии наук. Науки о земле*. – 2020. – Т. 491. – № 2. – С. 77–81.
44. Гидрохимические характеристики поверхностного стока озера Байкал (1997–2003) / П.В. Коваль, Ю.Н. Удодов, Л.Д. Андрулайтис, А.Е. Гапон, О.А. Склярова, С.Е. Чернигова // *Доклады российской академии наук*. – 2005. – Т. 401. – № 5. – С. 663–667.
45. Государственный доклад «О состоянии озера Байкал и мерах по его охране в 2022 году». – Иркутск: ФГБУН Институт географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, 2023. – 372 с.
46. Антропогенная компонента и баланс ртути в экосистеме Братского водохранилища / П.В. Коваль, Г.В. Калмычков, С.М. Лавров, Ю.Н. Удодов, Е.В. Бутаков, Ф.В. Файфилд, В.И. Алиева // *Доклады Академии наук*. – 2003. – Т. 388. – № 5. – С. 225–227.
47. Ефимова Н.В., Лисецкая Л.Г. Содержание ртути в биосубстратах населения Иркутской области // *Токсикологический вестник*. – 2007. – № 3. – С. 11–15.
48. Государственный доклад «О состоянии и охране окружающей среды Республики Бурятия в 2023 году». – Улан-Удэ: Министерство природных ресурсов и экологии Республики Бурятия, 2024. – 384 с.
49. Nguyen L.S.P., Hien T.T. Long-range atmospheric mercury transport from across East Asia to a suburban coastal area in Southern Vietnam // *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*. – 2024. – Vol. 112. – P. 1033–1039. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00128-023-03842-1>

50. Atmospheric particulate-bound mercury (PBM10) in a Southeast Asia megacity: sources and health risk assessment / L.S.P. Nguyen, T.T. Hien, M.T. Truong, N.D.T. Chi, G.R. Sheu // *Chemosphere*. – 2022. – Vol. 307. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.135707>.
51. UN Environment (2019) Global mercury assessment 2018. UN Environment Programme, Chemicals and health branch. – Geneva, Switzerland. URL: <https://www.unep.org/resources/publication/global-mercury-assessment-2018> (дата обращения 01.12.2024).
52. Characteristics of total gaseous mercury at a tropical megacity in Vietnam and influence of tropical cyclones / L.S.P. Nguyen, T.D.H. Pham, M.T. Truong, A.N. Tran // *Atmospheric Pollution Research*. – 2023. – Vol. 14 (8). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apr.2023.101813>.
53. Методы дендрохронологии / С.Г. Шиятов, Е.А. Ваганов, А.В. Кирдянов, В.Б. Круглов, В.С. Мазепа, М.М. Наурзбаев, Р.М. Хантемиров. – Красноярск: КрасГУ, 2000. – 80 с.
54. Томская область в предвоенные, военные годы и послевоенное восстановление: Юб. стат. сб. Томскстат. – Томск, 2020. – 105 с.
55. Забелина А.А., Полтинина Е.В. Память о великом подвиге: «цифры и факты». – Иркутск: Иркутскстат, 2020. – 50 с.
56. Nguyễn Kim Hoàng. Phân vùng sinh khoáng và triển vọng, Tạp chí phát triển KH&CN, tập 16, số M2 – 2013, tr 85–96.
57. The effects of herbicides in South Vietnam, Part A – summary and conclusions. Special collections, USDA National Agricultural Library. National Academy of Sciences (NAS) – 1974. DOI: <https://www.nal.usda.gov/exhibits/speccoll/items/show/1318>.
58. Multi-decadal decline of mercury in the North Atlantic atmosphere explained by changing subsurface seawater concentrations / A.L. Soerensen, D.J. Jacob, D.G. Streets, M.L.I. Witt, R. Ebinghaus, R.P. Mason, M. Bernander, E.M. Sunderland // *Geophysical Research Letters*. – 2012. – Vol. 39. DOI: 10.1029/2012GL053736.
59. United Nations Environment Programme. Global Mercury Assessment 2013: Sources, Emissions, Releases and Environmental Transport. – 2013. DOI: <http://unep.org/hazardoussubstances/>.

Информация об авторах

Ле Тхи Хонг Шанг, аспирант отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. thihongshang1@tpu.ru; <https://orcid.org/0009-0004-6708-8825>

Наталья Владимировна Барановская, доктор биологических наук, профессор отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. nata@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3729-800X>

Елена Евгеньевна Ляпина, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории физики климатических систем Института мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Россия, 634055, г. Томск, пр. Академический, 10/3. eeldv@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6116-0567>

Мария Германовна Крачнакова, магистрант отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. mgk8@tpu.ru; <https://orcid.org/0009-0006-0848-0645>

Поступила в редакцию: 16.12.2024

Поступила после рецензирования: 13.01.2025

Принята к публикации: 03.02.2025

REFERENCES

1. Rikhvanov L.P., Yusupov D.V., Tursunaliyeva E.M., Pavlova A.A., Lyapina E.E. Mercury emanations from the Baikal rift: evidence from the study of annual tree rings (an example of the Tunka Depression). *Doklady Earth Sciences*, 2021, vol. 496, no. 1, pp. 32–36. (In Russ.)
2. Chernenkaya E.V. *Dynamics of changes in the elemental composition of the natural environment according to the data of herbarium and modern collections of plants in the south of Siberia*. Cand. Dis. Tomsk, 2016. 262 p. (In Russ.)
3. Yusupov D.V., Lyapina E.E., Tursunaliyeva E.M. Poplar tree (*Populus Balsamifera* L.) as indicator of mercury emission from a point source. *Chemosphere*, 2022, vol. 287, pp. 132–157. DOI: doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132157.
4. Tursunaliyeva E.M. *Ecogeochemistry of mercury in woody plants of the poplar genus (leaves and annual rings) of urbanized areas of Siberia and the Far East*. Cand. Dis. Tomsk, 2022. 140 p. (In Russ.)
5. Yusupov D.V. *Methodology for biogeochemical indication of urban and mining areas based on the analysis of woody vegetation*. Dr. Diss. Tomsk, 2022. 344 p. (In Russ.)
6. Lyapina E.E. *Ecogeochemistry of mercury in natural environments of the Tomsk region*. Cand. Dis. Tomsk, 2012. 154 p. (In Russ.)
7. Lyapina E.E. Ecological and geochemical features of mercury accumulation in coniferous wood in the Altai Region. *Forestry Engineering Journal*, 2023, vol. 13, no. 4 (52), P. 2, pp. 95–109 (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.4/19>.
8. Lyapina E.E., Le Thi Hong Sang, Krachnakova M.G., Baranovskaya N.V., Markelova A.N., Zolotov S.Yu. Dendrogeochemistry of Hg according to the study of Scots pine (*Pinus Sylvestris* L.) in the Tomsk region. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Asset Engineering*, 2024, vol. 335, no. 8, pp. 125–136. (In Russ.)

9. Rikhvanov L.P., Arkhangelskaya T.A., Zamyatina Y.L. *Dendroradiography as a method of retrospective assessment of the radioecological situation: monograph*. Tomsk, Deltaplan Publ., 2015. 148 p. (In Russ.)
10. Xu C., Zhao Y., An W. Method to measure tree-ring width, density, elemental composition, and stable carbon and oxygen isotopes using one sample. *J. For. Res.* 2024, vol. 35, no. 56. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11676-024-01707-9>
11. Lepp N.W. The potential on tree-ring analysis for monitoring heavy metal pollution patterns. *Environ Pollut*, 1975, vol. 9, pp. 49–61.
12. Cutter B.E., Guyette R.P. Anatomical, Chemical, and ecological factors affecting tree species choice in dendrochemistry studies. *J. Environ. Qual.*, 1993, vol. 22, pp. 611–619.
13. Watmough S.A. Monitoring historical changes in soil and atmospheric trace metal levels by dendrochemical analysis. *Environ Pollut.*, 1999 Sep, vol. 106 (3), pp. 391–403. DOI: 10.1016/s0269-7491(99)00102-5. PMID: 15093035.
14. Watmough S.A., Hutchinson T.C. Historical changes in lead concentrations in tree-rings of sycamore, oak and Scots pine in north-west England. *Science of the Total Environment*, 2002, vol. 293 (1–3), pp. 85–96.
15. Watmough S.A., Hutchinson T.C. Uptake of 207Pb and 111Cd through bark of mature sugar maple, white ash and white pine: a field experiment. *Environmental Pollution*, 2003, vol. 121 (1), pp. 39–48.
16. Mironova A.S., Rikhvanov L.P., Baranovskaya N.V., Sudyko A.F. Annual rings of Scots pine (*Pinus Sylvestris* L.) – an indicator of the geochemical situation and chronological changes in the chemical elemental composition of the environment. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 1, pp. 106–116. (In Russ.) DOI: 10.18799/24131830/2020/1/2452.
17. Huhu Kang, Xiaohong Liu, Junming Guo, Bo Wang, Guobao Xu, Guoju Wu, Shichang Kang, Jie Huang Characterization of mercury concentration from soils to needle and tree rings of Schrenk spruce (*Picea schrenkiana*) of the middle Tianshan Mountains, northwestern China. *Ecological Indicators*, 2019. DOI: 10.1016/j.ecolind.2019.04.066.
18. Arnold J., Gustin M.S., Weisberg P.J. Evidence for nonstomatal uptake of Hg by aspen and translocation of Hg from foliage to tree rings in Austrian Pine. *Environ. Sci. Technol.*, 2018, vol. 52, pp. 1174–1182.
19. Programme U.N.E. (*United Nations Environment Programme, Chemicals and Health Branch*). Geneva, 2019. Available at: <https://www.unep.org/resources/global-environment-outlook-6> (accessed 15 November 2024).
20. Horowitz H.M. A new mechanism for atmospheric mercury redox chemistry: implications for the global mercury budget. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2017, vol. 17, pp. 6353–6371. DOI: 10.5194/acp-17-6353-2017.
21. Kumar A., Wu S., Huang Y., Liao H., Kaplan J.O. Mercury from wildfires: global emission inventories and sensitivity to 2000–2050 global change. *Atmos Environ*, 2018, vol. 173, pp. 6–15. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.10.061>
22. Outridge P.M., Mason R.P., Wang F., Guerrero S., Heimbürger-Boavida L.E. Updated global and oceanic mercury budgets for the United Nations global mercury assessment 2018. *Environmental Science & Technology*, 2018, vol. 52, pp. 11466–11477. DOI: 10.1021/acs.est.8b01246 (Q).
23. Ahn Young Sang, Raee Jung, Jae-Hyun Moon. Approaches to understand historical changes of mercury in tree rings of Japanese Cypress in industrial areas. *Forests*, 2020, vol. 11, no. 8, pp. 800. DOI: <https://doi.org/10.3390/f11080800>
24. Zhou J., Obrist, D., Dastoor A. Vegetation uptake of mercury and impacts on global cycling. *Nat Rev Earth Environ*, 2021, vol. 2, pp. 269–284. DOI: <https://doi.org/10.1038/s43017-021-00146-y>
25. Tatzber M., Fürst A. Mercury in tree rings close to emission sources in Austria. *Environ Sci Pollut Res*, 2023, vol. 30, pp. 86084–86096. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-023-28251-z>
26. Zhang F., Xu Z., Xu X. Terrestrial mercury and methylmercury bioaccumulation and trophic transfer in subtropical urban forest food webs. *Chemosphere*, 2022, vol. 299, 134424. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2022.134424.
27. Dobrovolskiy V.V. *Fundamentals of biogeochemistry*. Moscow, Akademiya Publ., 2003. 400 p. (In Russ.)
28. Lunina O.V., Gladkov A.S., Gladkov A.A. Systematization of active faults for seismic hazard estimation. *Pacific Geology*, 2012, vol. 31, no. 1, pp. 49–60. (In Russ.)
29. Yusupov D., Rikhvanov L., Robertus Yu., Lyapina E., Tursunaliyeva E., Baranovskaya N., Osipova N. Mercury in poplar leaves in the urbanized areas of Southern Siberia and the Far East. *Ecology and Industry of Russia*, 2018, vol. 22 (12), pp. 56–62. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2018-12-56-62>
30. Mashjanov N.R. Problems of environmental safety. *Toxic metals, “Mineral”*, 1999, vol. 1, pp. 5–64. (In Russ.)
31. Zhang H., Fu X.W., Wang X., Feng X.B. Measurements and distribution of atmospheric particulate-bound mercury: a review. *Bull Environ Contam Toxicol*, 2019, vol. 103, pp. 48–54. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00128-019-02663-5>
32. Huy B., Canh Nam L., Poudel K.P., Temesgen H. Individual tree diameter growth modeling system for Dalat pine (*Pinus dalatensis* Ferré) of the upland mixed tropical forests. *For. Ecol. Manag.*, 2021, vol. 480, Article 118612. DOI: 10.1016/j.foreco.2020.118612
33. IUCN, 2019. *The IUCN Red list of Threatened Species*. Available at <https://www.iucnredlist.org/> (accessed 1 December 2024).
34. Nováková T., Navrátil T., Demers J.D., Roll M., Rohovec J. Contrasting tree ring Hg records in two conifer species: Multi-site evidence of species-specific radial translocation effects in Scots pine versus European larch. *Sci. Total Environ.*, 2021, vol. 762, 144022, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144022>
35. Świątek B., Kra W., Pietrzykowski M. Adaptation of *Betula pendula* Roth., *Pinus sylvestris* L., and *Larix decidua* Mill. to environmental stress caused by tailings waste highly contaminated by trace elements. *Environ Monit Assess*, 2024, vol. 196, vol. 52. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10661-023-12134-4>
36. Evseeva N.S. *Geography of the Tomsk Region. (Natural conditions and resources)*. Tomsk, Tomsk University Publ., 2001. 223 p. (In Russ.)
37. Rikhvanov L.P., Zamyatina Yu.L., Mezhibor A.M., Arkhangelskaya T.A., Ivanov A.Yu. Reconstruction of the radiation situation on the territory of the Tomsk region according to stratified natural formations. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2011, vol. 319, no. 1, pp. 199–203. (In Russ.)
38. Talovskaya A.V. *Ecogeochemistry of atmospheric aerosols in urbanized territories of southern Siberia*. Cand. Dis. Tomsk, 2022. 170 p. (In Russ.)

39. Yazikov E.G. Development of the methodology of complex ecological and geochemical assessment of the state of the natural environment (on the example of objects of the south of Western Siberia). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2001, vol. 304, no. 1, pp. 325–336.
40. *Ecology of the Northern Industrial Hub of Tomsk. Problems and Solutions*. Ed. by A.M. Adam. Tomsk, TSU Publ., 1994. 260 p. (In Russ.)
41. Letuvninkas A.I., Stroitelev A.D., Kvasnikov A.V. *Geochemical aspects of the state of the natural environment in the area of the Tugansk titanium-zirconium deposit*. Tomsk, Tomsk State University Publ., 1995. pp. 93–99.
42. Letuvninkas A.I., Biryukov V.G., Stroitelev A.D. Tugansk complex field in Tomsk region. *Ore deposits. Mineralogy. Geochemistry: Collection of Articles*. Tomsk, National Research Tomsk State University, 2000. pp. 139–178. (In Russ.)
43. Grebenshchikova V.I., Kuzmin M.I., Klyuchevskii A.V., Demyanovich V.M., Kluchevskaya A.A. Elevated mercury in the water source of the Angara river source: A response to geodynamic impacts and severe earthquakes. *Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Earth Sciences*, 2020, vol. 491, no. 2, pp. 77–81. (In Russ.)
44. Koval P.V., Udodov Yu.N., Andrulaitis L.D., Gapon A.E., Sklyarova O.A., Chernigova S.E. Hydrochemical characteristics of the surface runoff of Lake Baikal (1997–2003). *DAN*, 2005, vol. 401, no. 5, pp. 663–667. (In Russ.)
45. *State report "On the state of Lake Baikal and measures for its protection in 2022"*. Irkutsk, V.B. Sochava Institute of Geography SB RAS Publ., 2023. 372 p. (In Russ.)
46. Koval P.V., Kalmychikov G.V., Udodov Yu.N. Anthropogenic component and mercury balance in ecosystem of the Bratsk hydropower reservoir. *Doklady Earth Sciences*, 2003, vol. 388, no. 1, pp. 60–62. (In Russ.)
47. Yefimova N.V., Lisetskaya L.G. Concentration of mercury in biosubstrates of the population of the Irkutsk Region. *Toxicological Review*, 2007, vol. 3, pp. 11–15. (In Russ.)
48. *State report "On the state and protection of the environment of the Republic of Buryatia in 2023"*. Ulan-Ude, Ministry of Natural Resources and Ecology of the Republic of Buryatia Publ., 2024. 384 p. (In Russ.)
49. Nguyen L.S.P., Hien T.T. Long-range atmospheric mercury transport from across East Asia to a suburban coastal area in Southern Vietnam. *Bull Environ Contam Toxicol*, 2024, vol. 112, no. 14. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00128-023-03842-1>
50. Nguyen L.S.P., Hien T.T., Truong M.T., Chi N.D.T., Sheu G.R. Atmospheric particulate-bound mercury (PBM10) in a Southeast Asia megacity: sources and health risk assessment. *Chemosphere*, 2022, vol. 307, 135707. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.135707>
51. *UN Environment (2019) Global mercury assessment 2018. UN Environment Programme, Chemicals and health branch*. Geneva, Switzerland. Available at: <https://www.unep.org/resources/publication/global-mercury-assessment-2018> (accessed 1 December 2024).
52. Nguyen L.S.P., Pham T.D.H., Truong M.T., Tran An. Characteristics of total gaseous mercury at a tropical megacity in Vietnam and influence of tropical cyclones. *Atmos Pollut Res*, 2023, vol. 14 (8), 101813. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apr.2023.101813>
53. Shiyatov S.G., Vaganov E.A., Kirdyanov A.V., Kruglov V.B., Mazepa V.S., Naurzbaev M.M., Khantemirov R.M. *Methods of dendrochronology*. Krasnoyarsk, KrasGU Publ., 2000. 80 p. (In Russ.)
54. *Tomsk region in the pre-war, war years and post-war reconstruction. Tomskstat*, Tomsk, 2020. 105 p. (In Russ.)
55. Zabelina A. A., Poltina E.V. *Memory of the great feat: "figures and facts"*. Irkutsk, Irkutskstat Publ., 2020. 50 p. (In Russ.)
56. Nguyen Kim Hoang. Gold metallogenic zoning and mineralized prospect in Dalat zone. *Science & Technology Development*, 2013, vol. 16, no. M2, pp. 85–96. (In Vietnamese).
57. *National Academy of Sciences. Report: The Effects of herbicides in South Vietnam, Part A – summary and conclusions*. Special Collections, USDA National Agricultural Library. 1974. DOI: <https://www.nal.usda.gov/exhibits/speccoll/items/show/1318>
58. Soerensen A.L., Jacob D.J., Streets D.G., Witt M.L.I., Ebinghaus R., Mason R.P., Andersson M., Sunderland E.M. Multi-decadal decline of mercury in the North Atlantic atmosphere explained by changing subsurface seawater concentrations. *Geophys. Res. Lett.*, 2012, vol. 39, L21810. DOI: [10.1029/2012GL053736](https://doi.org/10.1029/2012GL053736).
59. *United Nations Environment Programme. Global Mercury Assessment 2013: Sources, Emissions, Releases and Environmental Transport*. 2013. DOI: <http://unep.org/hazardoussubstances/>.

Information about the authors

Le Thi Hong Sang, Postgraduate Student, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. thihongshang1@tpu.ru; <https://orcid.org/0009-0004-6708-8825>

Natalia V. Baranovskaya, Dr. Sc., Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. nata@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3729-800X>

Elena E. Lyapina, Cand. Sc., Senior Researcher, Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, 10/3, Akademicheskiiy avenue, Tomsk, 634055, Russian Federation. eeldv@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6116-0567>

Maria G. Krachnakova, Master Student, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. mgk8@tpu.ru; <https://orcid.org/0009-0006-0848-0645>

Received: 16.12.2024

Revised: 13.01.2025

Accepted: 03.02.2025

УДК 542.9
DOI: 10.18799/24131830/2025/2/4650
Шифр специальности ВАК: 1.4.12

Дегидрирование изобутана в присутствии CO₂ на CrO_x/SiO₂ катализаторе, модифицированном металлами 2 группы

Н.С. Скрипаль✉, Н.С. Королев

Военный инновационный технополис «ЭРА», Россия, г. Анапа

✉era_lab2@mil.ru

Аннотация. Актуальность. В связи с ростом потребности в олефинах, в частности в изобутилене, требуется повышение эффективности работы технологических процессов, а также катализаторов. В случае окисдно-хромовых систем требуется повышение активности и стабильности их работы. Помимо этого, окислительное дегидрирование низших алканов в крупнотоннажном производстве приводит к утилизации парникового газа CO₂. В процессе образует угарный газ, который является важным компонентом для производства синтетических углеводородов. **Цель.** Определить влияние промоторов металлов 2 группы на активность и стабильность окисдно-хромовых катализаторов при окислительном дегидрировании изобутана. **Методы.** Системное исследование Ca, Sr и Ba добавок с использованием SiO₂ было проведено для Cr-содержащих катализаторов дегидрирования изобутана в присутствии CO₂. Для модификации структуры каталитических систем и повышения эффективности дегидрирования были введены методом равновесной адсорбции металлы 2 группы в качестве модифицирующих добавок. Анализ поверхности каталитических систем осуществлялся термопрограммируемым восстановлением. **Результаты и выводы.** Исследование модифицированного окисдно-хромового катализатора показало, что промоторы на основе металлов 2 группы повышают эффективность работы в процессе дегидрирования изобутана в присутствии CO₂, отражаемое в высоком выходе целевого продукта. Высокими показателями выхода обладают образцы Cr (3 %) O_x/PA (10) – Ca /КСКГ и Cr (3 %) O_x/PA (20) – Ba/КСКГ (55 и 54 % соответственно). Было выявлено, что содержание модифицирующих добавок сильно влияет на работу катализатора, в случае повышения содержания кальция наблюдается увеличение активности и стабильности каталитической системы, что отражается на повышении выхода целевого продукта. Термопрограммируемое восстановление модифицированного катализатора показало, что введение металлов 2 группы снижает долю доступного хрома на поверхности носителя.

Ключевые слова: щелочноземельные металлы, окисдно-хромовый катализатор, окислительное дегидрирование изобутана, термопрограммируемое восстановление водородом, изобутилен

Для цитирования: Скрипаль Н.С., Королев Н.С. Дегидрирование изобутана в присутствии CO₂ на CrO_x/SiO₂ катализаторе, модифицированном металлами 2 группы // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 2. – С. 231–240. DOI: 10.18799/24131830/2025/2/4650

UDC 542.9
DOI: 10.18799/24131830/2025/2/4650

Dehydrogenation of isobutane in the presence of CO₂ on CrO_x/SiO₂ catalyst modified by the metals of the 2nd group

N.S. Skripal✉, N.S. Korolev

Military innovation technopolis "ERA", Anapa, Russian Federation

✉era_lab2@mil.ru

Abstract. Relevance. Growing demand for olefins, in particular, for isobutylene. Increasing productivity requires an increase in the efficiency of technological processes, as well as catalysts. In the case of chromium oxide catalysts, increased activity and

stability are required. In addition, the increase in the use of CO₂ greenhouse gas in large-scale production leads to recycling. **Aim.** To determine the effect of 2nd group metal promoters on the activity and stability of chromium oxide catalysts during oxidative dehydrogenation of isobutane. **Methods.** A systematic study of Ca, Sr and Ba additives using SiO₂ was conducted for Cr-containing isobutane dehydrogenation catalysts in the presence of CO₂. To modify the structure of the catalyst and increase the efficiency of dehydrogenation, the 2nd group metals were introduced by the method of equilibrium adsorption as modifying additives. The analysis of the surface of the catalytic systems was carried out by thermoprogrammable reduction. **Results and conclusions.** A study of a modified chromium oxide catalyst showed that promoters based on the 2nd group metals increase the efficiency of isobutane dehydrogenation in the presence of CO₂, reflected in the high yield of the target product. The samples of Cr (3%) O_x/RA (10) – Ca/KSKG and Cr (3%) O_x/RA (20) – Ba/KSKG (55 and 54%, respectively) have high yield indicators. The authors have revealed that the content of modifying additives strongly affects the operation of the catalyst, in the case of calcium content growth, an increase in the activity and stability of the catalytic system is observed, which is reflected in an increase in the yield of the target product. Thermoprogrammable reduction of the modified catalyst showed that the introduction of the 2nd group metals reduces the proportion of available chromium on the surface of the carrier.

Keywords: alkaline earth metals, chromium oxide catalyst, oxidative dehydrogenation of isobutane, thermoprogrammable reduction with hydrogen, isobutylene

For citation: Skripal N.S., Korolev N.S. Dehydrogenation of isobutane in the presence of CO₂ on CrO_x/SiO₂ catalyst modified by the metals of the 2nd group. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 2, pp. 231–240. DOI: 10.18799/24131830/2025/2/4650

Введение

Изобутилен является важным промежуточным продуктом для нефтехимического синтеза [1–5]. Однако производство изобутена традиционными способами не может обеспечить его достаточное количество для удовлетворения растущего рыночного спроса [2]. В последние годы процесс производства изобутена из изобутана дегидрированием привлек широкое внимание исследователей и обеспечивает экономически эффективный путь производства [6, 7]. Кроме того, зрелость технологии добычи сланцевого газа снизила цену на низшие алканы и создала хорошие условия для дегидрирования изобутана с целью получения изобутена [8].

В промышленных процессах дегидрирования применяются катализаторы на основе хрома или платины, обычно на глиноземном носителе и промотированные щелочными металлами [9]. Несмотря на то, что были сделаны значительные улучшения для обоих типов каталитических материалов, остается ряд экономических, экологических и технологических проблем, которые еще предстоит решить. Несмотря на хорошие показатели дегидрирования катализаторов на основе CrO_x [10–16], нельзя игнорировать их токсичность для окружающей среды. Платиносодержащие катализаторы обладают быстрой дезактивацией в результате осаждения кокса и спекания в ходе работы и высокой стоимостью производства.

В настоящее время исследования процессов каталитического дегидрирования легких парафинов сосредоточены на оптимизации катализаторов как с точки зрения активности, так и с точки зрения стабильности. В качестве направлений оптимизации рассматривается варьирование носителя (TiO₂, Al₂O₃, пористые силикаты). Кроме того, активно изучаются различные модифицирующие добавки, например, в виде щелочных [17] и щелочноземельных металлов [18].

Известно, что на активность катализаторов процесса дегидрирования на основе Cr влияют щелочные и щелочноземельные металлы. Промоторы из щелочноземельных металлов могут способствовать образованию комплексов CrO₃, которые в восстановительной атмосфере превращаются в каталитически активный Cr₂O₃ [19]. Кислотность катализатора на основе Cr также была изменена, что способствовало подавлению побочных реакций, таких как крекинг и изомеризация. Активность и селективность по отношению к алкенам продукта, соответственно, повышались. В связи с этим настоящая работа посвящена изучению возможностей модифицирования CrO_x/SiO₂ щелочноземельными металлами в дегидрировании изобутана в присутствии CO₂.

Экспериментальная часть

В настоящей работе изучается влияние щелочноземельных добавок на эффективность оксидно-хромовых систем, нанесенных на силикагель. Эффективность Cr/SiO₂ катализаторов в дегидрировании изобутана была показана выше. Однако эта система имеет возможности к оптимизации по стабильности к активной фазе.

Задачи:

1. Приготовление оксидно-хромовых катализаторов с добавками двухвалентных металлов с различным содержанием.
2. Испытание приготовленных катализаторов в реакции дегидрирования изобутана в присутствии CO₂.

Методика проведения эксперимента

Газовая смесь, состоящая из изобутана, углекислого газа и азота в объемном соотношении 0,1:0,35:0,55, из баллона поступала в реакционный

цикл со скоростью 1 литр в час. Температура реакции составляла 550 и 600 °С. Продуктовая смесь после реактора направлялась в хроматограф.

Реакционная зона включала в себя реактор и электропечь. Реактор изготовлен из кварцевого стекла U-образной трубки. С помощью хромель-алюминиевой термопары осуществлялся контроль и измерение температуры слоя катализатора. Стационарный слой катализатора находился между слоев кварца на стеклянной сетке объемом 15 дм³.

Исходные вещества и система очистки

При проведении экспериментов были использованы:

- изобутан особой чистоты (99,8 %);
- диоксид углерода с высокой степенью чистоты (99,9 %);
- азот 99,8 % чистоты;
- кислород 99,8 % чистоты;
- хром нитрат наногидрат – 99 %; барий гидрат окиси – хч; стронций нитрат – 99 %; кальций нитрат тетрагидрат – 99 %;
- силикагель – KSKG.

С целью соблюдения постоянства состава готовилась смесь с содержанием компонентов изобутана: CO₂:N₂=10:35:55 следующим образом: в баллон емкостью 10 л напускалось 3,75 атм. изобутана, 7,5 атм. двуокиси углерода и азотом общее давление доводилось до 25 атм. с использованием образцового манометра. Состав полученной смеси анализировали хроматографически.

Методика проведения хроматографического анализа

Анализ продуктов реакции проводился на хроматографе ЛХМ-8МД, оснащенный катарометром в качестве детектора.

Продукты реакции проходили через две хроматографические колонки:

- 1) 2000 ± 3 мм, заполненную молекулярными ситами 5А, фракция 0,25–0,5 мм, для определения в смеси кислорода, азота, монооксида углерода и метана;
- 2) 3000 ± 3 мм, заполненную фазой Porapak-Q, фракция 40–60 меш., для определения в смеси метана, диоксида углерода, олефинов и низших парафинов, образовавшихся в процессе.

Наличие двух колонок необходимо для проведения сравнения пиков хроматограммы.

Температура в колонках составляла 75 °С и была постоянной. Газом-носителем являлся гелий, подаваемый в колонки со скоростью 1,8 литров в час.

Обработка результатов хроматографического анализа проводилась в программе «Экохром», расчет полученных данных производился в программе «Excel».

Приготовление катализаторов

Катализатор готовили по методу равновесной адсорбции из водного раствора нитрата хрома на силикагель. Метод состоит из нескольких операций:

- гранулирование;
- прокаливание носителя (силикагель);
- нанесение активной фазы (CrO_x);
- удаление воды;
- прокаливание.

Количество нитратов металлов m_(с): хрома, бария, стронция и кальция, необходимых для приготовления катализатора, рассчитывалось по формуле (1):

$$m_{(с)} = \frac{m_{(н)} \cdot M_{(с)}}{M_{(Ме)}} \cdot \frac{C_{(\%Ме)}}{(100 - C_{(\%Ме)})}, \quad (1)$$

где m_(н) – масса носителя; M_(с) – молекулярная масса соли; M_(Ме) – атомный вес наносимого металла; C_(%Ме) – необходимое содержание наносимого металла.

Рассчитанную массу соли растворяли в дистиллированной воде. Затем в раствор добавляли носитель при перемешивании. Перед этим носитель прокаливали при подаче воздуха для осушки при 600 °С в течение 1 часа. Далее сушили катализатор до сухого состояния и проводили прокалику при той же температуре, что и для носителя, в течение 5 часов.

Метод равновесной адсорбции

Нанесение промоторов осуществлялось путем погружения носителя в водный раствор нитратов металлов при медленном выпаривании и перемешивании до сухого состояния.

Промотор в виде оксида металла наносится предварительно перед активным металлом методом равновесной адсорбции. Для этого готовится раствор соли металла. Концентрация варьируется от 5 до 30 мас. % металла для полного осаждения на силикагель. Силикагель прокаливают и добавляют в раствор при тщательном перемешивании. Затем образец оставляют на ночь. Далее весь раствор соли декантируют и просушивают силикагель на водяной бане при перемешивании. В кварцевом реакторе проводится прокалка в токе воздуха при температуре 60 0°С в течение 5 часов. На следующем этапе наносился активный металл методом осаждения.

Проведение термопрограммируемого восстановления

Исследования термопрограммируемого восстановления образцов катализаторов (ТПВ-H₂) проводили на проточной установке, снабженной системой линейного нагрева образцов, соединенной с детектором по теплопроводности. Перед ТПВ-H₂ измерениями образцы обрабатывали в токе сухого

гелия при 250 °С в течение 1 ч. Для проведения ТПВ использовали смесь H₂:Ar=10:90 (% об.), скорость подачи смеси составляла 2 л/ч, скорость нагревания – 10–20 °/мин. Перед детектором была установлена ловушка для улавливания воды с температурой около 100 °С.

Результаты исследования

Модифицирование катализаторов щелочными и щелочноземельными металлами является распространенным способом их оптимизации. Это относится и к катализаторам дегидрирования легких парафинов на основе переходных металлов, таких как хром, никель и другие [20].

На первом этапе были приготовлены и исследованы катализаторы с добавлением кальция. По приведенным результатам исследования катализатора Cr (3 %) O_x/PA (5) – Ca/КСКГ видно, что данная система теряет активность в процессе работы, очевидно, вследствие коксоотложений (рис. 1). Стоит отметить, что добавление 5 % кальция не приводит к повышению эффективности работы оксидно-хромового катализатора, поскольку наблюдаемый выход по целевому продукту ниже, чем на образце Cr (3 %) O_x/КСКГ (рис. 1, В).

Для образца катализатора Cr (3 %) O_x/PA (5) – Ca/КСКГ выход по изобутилену составляет 45 % (рис. 1, В), на немодифицированном образце Cr (3 %) O_x/КСКГ выход находится на уровне 47 % (рис. 1, В).

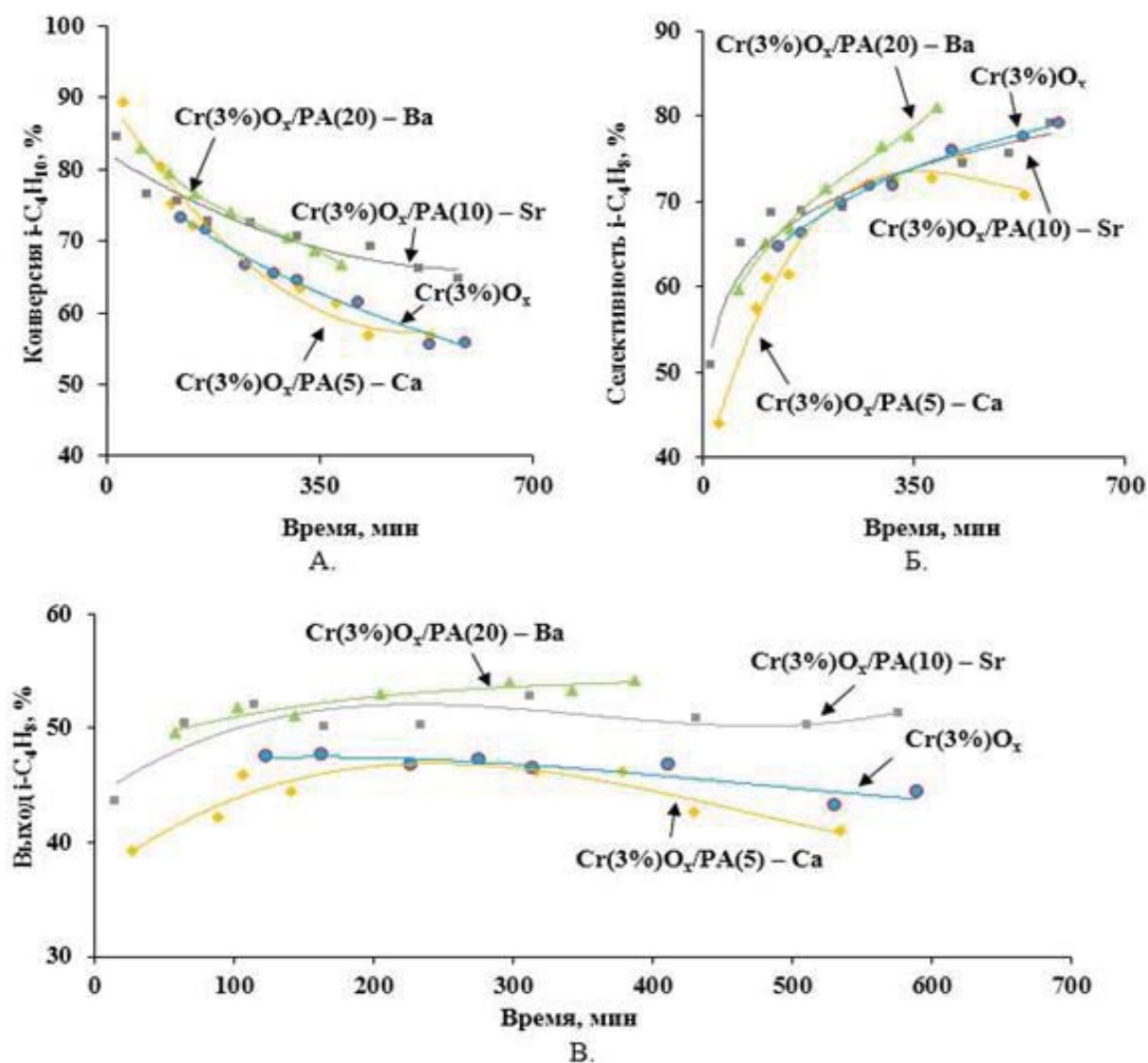


Рис. 1. Сравнение работы оксидно-хромового катализатора с различными добавками металлов 2 группы: А) конверсия изобутана в период работы катализатора; Б) селективность изобутилена в период работы катализатора; В) выход изобутилена в период работы катализатора

Fig. 1. Comparison of the operation of the chromium oxide catalyst with various additives of the 2nd group metals: А) isobutane conversion during the catalyst operation; Б) isobutylene selectivity during the catalyst operation; В) isobutylene yield during the catalyst operation

На следующем этапе работы был исследован оксидно-хромовый катализатор, модифицированный стронцием (Cr (3 %) O_x/PA (10) – $\text{Sr}/\text{КСКГ}$). На рис. 1 приведены данные изменения конверсии изобутана, селективности и выхода по целевому продукту. Данный модификатор имеет активность выше, чем у кальциевого модификатора в течение 10 часов работы катализатора (около 70 % (рис. 1, А)). Выход по целевому продукту поддерживается на высоком уровне (около 50 % (рис. 1, В)).

В качестве следующего модификатора для катализатора $\text{CrO}_x/\text{КСКГ}$ был выбран барий. Катализатор, содержащий барий (Cr (3 %) O_x/PA (20) – $\text{Ba}/\text{КСКГ}$ (рис. 1)), демонстрирует активность, аналогичную образцу со стронцием. Уровень активности остается высоким (выше 60 % (рис. 1, А)) на протяжении всего эксперимента. Образец показывает высокое значение выхода изобутилена (выше 50 % (рис. 1, В)). Это объ-

ясняется высоким показателем селективности по целевому продукту (около 80 % (рис. 1, Б)). Из всего сказанного можно заключить, что добавление бария повышает эффективность оксидно-хромового катализатора в процессе дегидрирования изобутана.

Дальнейший процесс окислительного дегидрирования изобутана проводили с увеличением содержания модифицирующих добавок металлов 2 группы. Приведенные результаты дегидрирования системы Cr (3 %) O_x/PA (10) – $\text{Ca}/\text{КСКГ}$ (рис. 2) показывают, что катализатор повышает начальную активность по сравнению с Cr (3 %) O_x/PA (5) – $\text{Ca}/\text{КСКГ}$. Даже после 12 часов работы выход по изобутену не опускается ниже 50 % (рис. 2, В). Таким образом, повышение содержания кальция в оксидно-хромовых катализаторах является эффективным, поскольку возрастает выход целевого изобутилена и стабильность работы.

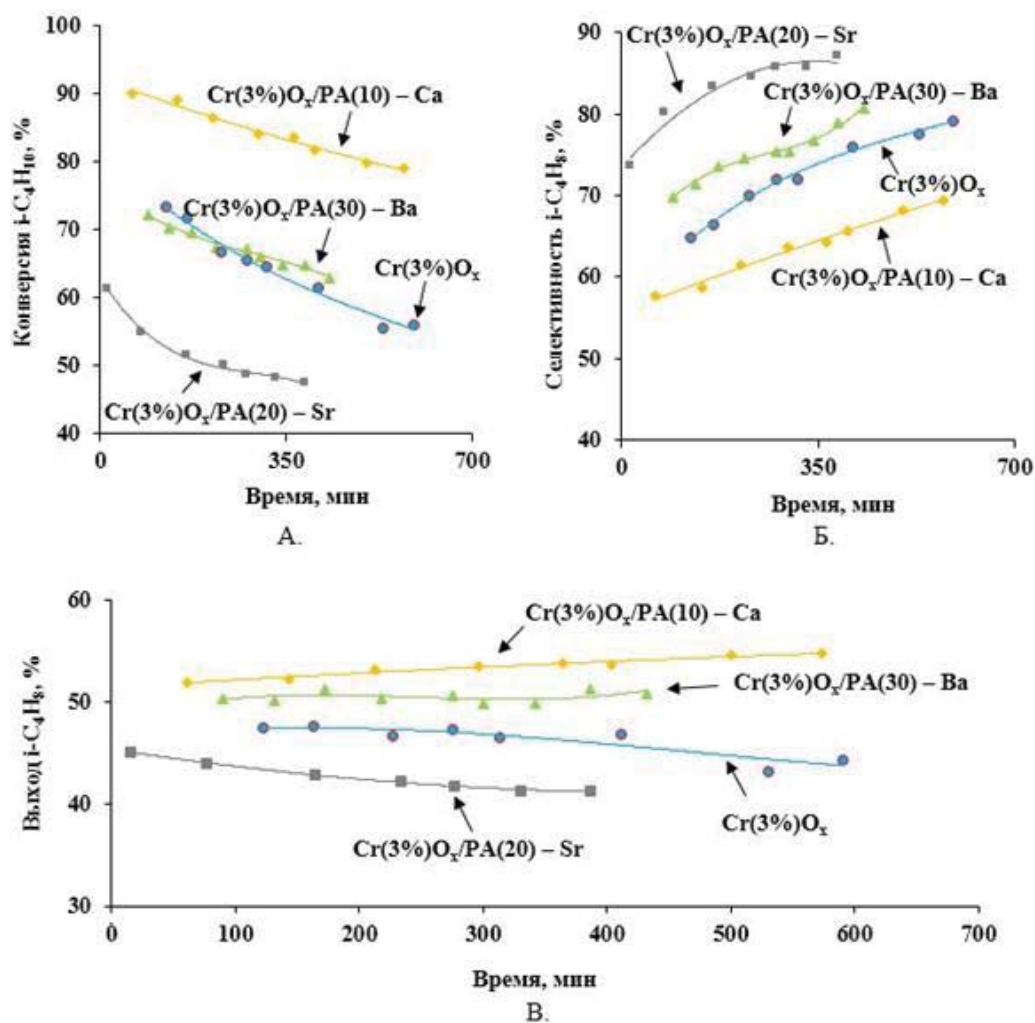


Рис. 2. Сравнение работы оксидно-хромового катализатора с увеличенным содержанием модифицирующих добавок металлов 2 группы: А) конверсия изобутана в период работы катализатора; Б) селективность изобутилена в период работы катализатора; В) выход изобутилена в период работы катализатора

Fig. 2. Comparison of the operation of the chromium oxide catalyst with an increased content of various modifying additives of the 2nd group metals: А) isobutane conversion during the catalyst operation; Б) isobutylene selectivity during the catalyst operation; В) isobutylene yield during the catalyst operation

По приведенным данным изменения конверсии изобутана на оксидно-хромовом катализаторе, модифицированном стронцием (Cr (3 %) O_x/PA (20) – Sr/КСКГ), селективности и выхода по целевому продукту при температуре 550 °С (рис. 2, Б, В, соответственно) видно, что повышение содержания стронция, приводит к снижению активности катализатора (конверсия снижается в среднем на 10 %) (рис. 2, А). Выход по изобутену не превышает 48 % (рис. 2, В). Таким образом, существует некий оптимум содержания щелочноземельных металлов в оксидно-хромовых системах, после которого промотирующий эффект снижается.

По результатам исследования активности катализатора Cr (3 %) O_x/PA (30) – Ba/КСКГ видно, что с ростом содержания бария активность катализатора сильно снижается (начальная активность для Cr

(3 %) O_x/PA (20) – Ba/КСКГ около 82 % (рис. 1, А), для Cr (3 %) O_x/PA (30) – Ba/КСКГ около 72 % (рис. 2, А)). Необходимо отметить, что выход по целевому продукту сохраняется на достаточном высоком уровне (47–50 % (рис. 2, В)), хотя и падает в ходе работы. Таким образом, как и в случае модифицирования оксидно-хромового катализатора кальцием и стронцием промотирующий эффект имеет оптимум по содержанию бария, превышение этого оптимального содержания сопровождается снижением активности и стабильности оксидно-хромовых катализаторов на основе силикагеля.

Чтобы оценить возможности образцов катализаторов Cr (3 %) O_x/PA (10) – Ca/КСКГ, Cr (3 %) O_x/PA (10) – Sr/КСКГ, Cr (3 %) O_x/PA (20) – Ba/КСКГ, было решено изучить их активность при температуре 600 °С.

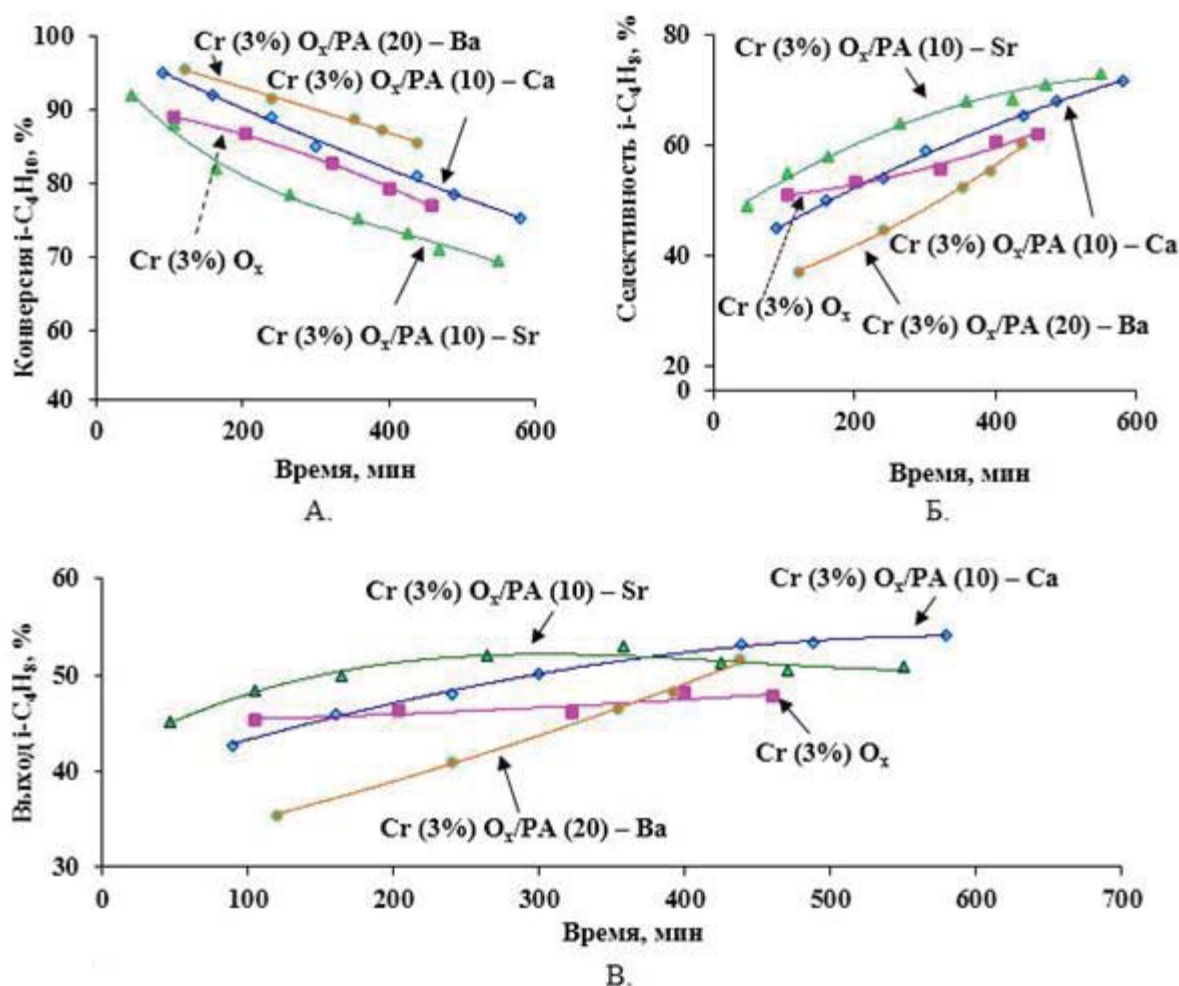


Рис. 3. Сравнение работы оксидно-хромового катализатора при температуре 600 °С с различными добавками металлов 2 группы: А) конверсия изобутана в период работы катализатора; Б) селективность изобутилена в период работы катализатора; В) выход изобутилена в период работы катализатора

Fig. 3. Comparison of chromium oxide catalyst operation at 600 °C with various extractions of the 2nd group metals: А) isobutane conversion during the catalyst operation; Б) isobutylene selectivity during the catalyst operation; В) isobutylene yield during the catalyst operation

По результатам видно, что с ростом температуры соотношение между катализаторами в активности и селективности меняется. Наиболее сильно изменяется активность катализатора, модифицированного барием. Видно, что при 550 °C ход конверсии изобутана (рис. 1, А) схож с аналогичным для Cr (3 %) O_x/PA (20) – Ba/KCKГ, однако при 600 °C уровень конверсии (рис. 3, А) заметно выше и селективность по изобутилену сильно падает (ниже 40 % (рис. 3, В)). Это приводит к тому, что выходы по изобутену во время эксперимента при температуре 600 °C намного ниже, чем при 550 °C. Выход поддерживается на высоком уровне (около 50 % (рис. 3, В)) в течение всего эксперимента.

Относительно других образцов барий-промотированный катализатор демонстрирует высокую начальную активность, однако его селективность изначально низка. Селективность, впрочем, быстро растет в ходе эксперимента, и через 7 часов работы выход по целевому продукту становится сравним с лучшими образцами, каковыми являются катализаторы, содержащие кальций и стронций (выход по изобутену выше 50 % (рис. 3, В)).

Исследования оксидно-хромового катализатора, модифицированного стронцием (Cr (3 %) O_x/PA (10) – Sr/KCKГ) при температуре 600 °C, показывают повышение конверсии, но селективность по изобутилену падает настолько, насколько возрастает конверсия. Это приводит к тому, что выход по изобутену во время эксперимента при температуре 600 °C уже через 300 минут работы достигает максимума, в то время как при 550 °C выход (рис. 1, В) поддерживается на высоком уровне (около 50 %) в течение всего эксперимента.

Также необходимо отметить, что катализатор, модифицированный стронцием, даже менее активен, чем не модифицированный образец, при этом высокая селективность по целевому продукту позволяет получать его с высоким выходом. Как и в случае не модифицированного образца, повышение температуры более 550 °C не позволяет увеличить выход целевого продукта, только приводит к снижению селективности.

Результаты исследования ТПВ-H₂ промотированных катализаторов

По представленным результатам исследования ТПВ-H₂ для катализаторов, промотированных металлами 2 группы, видно, что с ростом содержания кальция и стронция (рис. 4, 5, соответственно) снижается удельное поглощение водорода при ТПВ-H₂. Это может свидетельствовать об образовании трудновосстанавливаемых частиц, включающих хром и щелочноземельные металлы. Известно, что хроматы щелочноземельных металлов являются термически стабильными вплоть до

1000 °C. В случае введения кальция наблюдается явное присутствие двух разных видов оксидно-хромовых частиц, которые различаются по температуре восстановления.

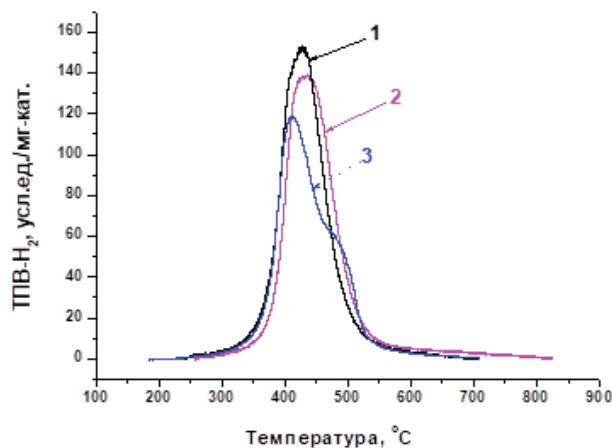


Рис. 4. Кривые ТПВ-H₂ для катализаторов, модифицированных кальцием: 1 – Cr(3 %)O_x/KCKГ; 2 – Cr (3 %) O_x/PA (5) – Ca/KCKГ; 3 – Cr (3 %) O_x/PA (10) – Ca/KCKГ

Fig. 4. TPV-H₂ curves for calcium modified catalysts: 1 – Cr(3%)O_x/KSKG; 2 – Cr (3%) O_x/RA (5) – Ca/KSKG; 3 – Cr (3%) O_x/RA (10) – Ca/KSKG

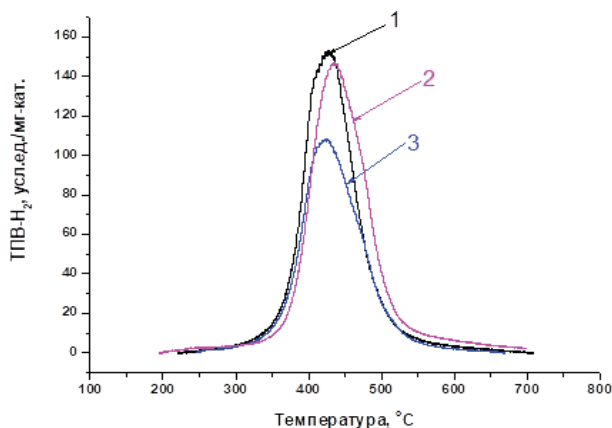


Рис. 5. Кривые ТПВ-H₂ для катализаторов, модифицированных стронцием: 1 – Cr(3 %)O_x/KCKГ; 2 – Cr (3 %) O_x/PA (10) – Sr/KCKГ; 3 – Cr (3 %) O_x/PA (20) – Sr/KCKГ

Fig. 5. TPV-H₂ curves for catalysts modified with strontium: 1 – Cr(3%)O_x/KSKG; 2 – Cr (3%) O_x/RA (10) – Sr/KSKG; 3 – Cr (3%) O_x/RA (20) – Sr/KSKG

Присутствие бария в катализаторе Cr (3 %) O_x/PA (20) – Ba/KCKГ (рис. 6), по сравнению с не модифицированным образцом, хотя и приводит к уменьшению пика поглощения водорода, но при этом сопровождается его расширением в сторону высоких и низких температур, однако площадь по-

глошения практически не меняется. Такой результат указывает на появления новых форм оксидно-хромовых частиц, связанных с барием, но при этом доступность этих частиц для взаимодействия с водородом практически не меняется.

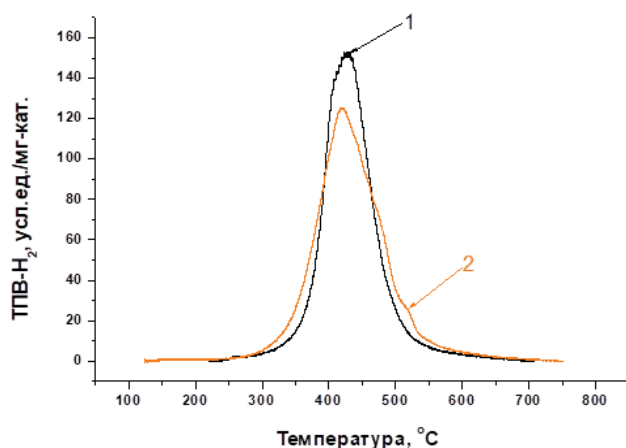


Рис. 6. Кривые ТПВ-H₂ для катализаторов, модифицированных барием: 1 – Cr(3 %)O_x/KCKГ; 2 – Cr(3 %) O_x/PA (20) – Ba/KCKГ

Fig. 6. TPV-H₂ curves for barium modified catalysts: 1 – Cr(3%)O_x/KSKG; 2 – Cr(3%) O_x/RA (20) – Ba/KSKG

Таким образом, при сравнительно низких содержаниях щелочноземельных металлов обнаруживается явное их влияние на оксидно-хромовую фазу, без изменения доступности хрома и активных центров на его основе для взаимодействия с компонентами газовой фазы. При этом обнаруживается значительное положительное влияние от введения модификаторов на эффективность катализаторов в дегидрировании изобутана. Избыточное количество модификатора, приводящее к появлению значительного количества новых фазовых состояний активной поверхности, напротив, снижает эффек-

тивность оксидно-хромовых систем в дегидрировании изобутана. Такой эффект объясняет снижение выхода целевого продукта на образце Cr (3 %) O_x/PA (20) – Sr/KCKГ.

Заключение

Модифицирование оксиднохромового катализатора щелочноземельными металлами демонстрирует высокие показатели конверсии и селективности процесса, что доказывает их положительное влияние на проведение реакции окислительного дегидрирования изобутана.

На данном этапе работы были проведены исследования введения модифицирующих добавок металлов 2 группы, сравнены их активности и стабильности. Показан положительный эффект использования кальция и отрицательный эффект использования стронция в качестве модификаторов оксиднохромовых катализаторов дегидрирования изобутана в присутствии CO₂.

Необходимо отметить:

1. Высокое содержание модификаторов в целом снижает активность катализаторов, особенно заметно это проявляется в случае введения в катализатор стронция – выходы по изобутилену снижаются в среднем на 5–7 %.
2. Катализатор, модифицированный стронцием, даже менее активен, чем не модифицированный образец, при этом высокая селективность по целевому продукту позволяет получать его с высоким выходом.
3. Барий повышает эффективность оксидно-хромовой системы в дегидрировании изобутана, однако его эффективность сильно снижается при высоких температурах.
4. Исследование термопрограммируемого восстановления катализаторов показало, что введение металлов 2 группы приводит к снижению доли свободного хрома на поверхности катализатора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Farsi M., Jahanmiri A., Rahimpour M.R. Optimal operating conditions of radial flow moving-bed reactors for isobutane dehydrogenation // Journal of Energy Chemistry. – 2013. – Vol. 22. – P. 633–638. DOI: 10.1016/S2095-4956(13)60083-2.
2. Isobutane dehydrogenation over InPtSn/ZnAl₂O₄ catalysts: effect of indium promoter / J. Liu, W. Zhou, D. Jiang, W. Wu, C. Miao, Y. Wang, X. Ma // Industrial & Engineering Chemistry Research. – 2018. – Vol. 57. – P. 11265–11270. DOI: 10.1021/acs.iecr.8b01728.
3. Дегидрирование легких алканов (обзор) / Д.П. Мельников, А.А. Новиков, А.П. Глотов, М.В. Решетина, Е.М. Смирнова, H.Q. Wang, B.A. Винокуров // Нефтехимия. – 2022. – Т. 62. – № 6. – С. 773–796. DOI: 10.31857/S0028242122060028.
4. Kustov L.M., Kucherov A.V., Finashina E.D. Oxidative dehydrogenation of C₂–C₄ alkanes into alkenes: conventional catalytic systems and microwave catalysis // Russian Journal of Physical Chemistry A. – 2013. – Vol. 87. – P. 345–351. DOI: 10.1134/S0036024413030151.
5. Плате Н.В., Сливинский Е.В. Основы химии и технологии мономеров. – М.: Наука: МАИК Наука/Интерпериодика, 2002. – 696 с.
6. Fluidized-bed isobutane dehydrogenation over alumina-supported Ga₂O₃ and Ga₂O₃-Cr₂O₃ catalysts / A.N. Matveyeva, N.A. Zaitseva, P. Maki-Arvela, A. Aho, A.K. Bachina, S.P. Fedorov, D.Y. Murzin, N.A. Pakhomov // Industrial & Engineering Chemistry Research. – 2018. – Vol. 57. – P. 927–938. DOI: 10.1021/acs.iecr.7b04571.
7. Im J., Choi M. Physicochemical stabilization of Pt against sintering for a dehydrogenation catalyst with high activity, selectivity, and durability // ACS Catalysis. – 2016. – Vol. 6. – P. 2819–2826. DOI: 10.1021/acscatal.6b00329.

8. State-of-the-art catalysts for direct dehydrogenation of propane to propylene / Z. Hu, D. Yang, Z. Wang, Z. Yuan // *Chinese Journal of Catalysis*. – 2019. – Vol. 40. – P. 1233–1254. DOI: 10.1016/S1872-2067(19)63360-7.
9. Kinetic modeling of isobutane dehydrogenation over Ga₂O₃/Al₂O₃ catalyst / A.N. Matveyeva, J. Wörnå, N.A. Pakhomov, D.Yu. Murzin // *Chemical Engineering Journal*. – 2020. – Vol. 381. – P. 122741–122750. DOI: 10.1016/j.cej.2019.122741.
10. Effect of alumina polymorph on the dehydrogenation activity of supported chromia/alumina catalysts / D.A. Nazimov, O.V. Klimov, I.G. Danilova, S.N. Trukhan, A.V. Saiko, S.V. Cherepanova, Y.A. Chesalov, O.N. Martyanov, A.S. Noskov // *Journal of Catalysis*. – 2020. – Vol. 391. – P. 35–47. DOI: 10.1016/j.jcat.2020.08.006.
11. Effect of steam-air treatment of alumina-chromia dehydrogenation catalysts on their physicochemical and catalytic characteristics / D.A. Nazimov, O.V. Klimov, A.V. Saiko, A.S. Noskov // *Russian Journal of Applied Chemistry*. – 2021. – Vol. 94. – P. 1283–1291. DOI: 10.1134/S1070427221090111.
12. Dehydrogenation of ethylbenzene and isobutane over Ga- and Fe-containing mesoporous silicas / N.S. Nesterenko, O.A. Ponomoreva, V.V. Yuschenko, I.I. Ivanova, F. Testa, F. Di Renzo, F. Fajula // *Applied Catalysis A: General*. – 2003. – Vol. 254. – P. 261–272. DOI: 10.1016/S0926-860X(03)00488-5.
13. Oxidative dehydrogenation of C₃–C₄ paraffins in the presence of CO₂ over CrO_x/SiO₂ catalysts / M.A. Botavina, G. Martra, Yu.A. Agafonov, N.V. Gaidai, N. Nekrasov, D.V. Trushin, S. Coluccia, A.L. Lapidus // *Applied Catalysis A: General*. – 2008. – Vol. 347. – P. 126–132. DOI: 10.1016/j.apcata.2008.05.037.
14. Study of vanadium based mesoporous silicas for oxidative dehydrogenation of propane and n-butane / R. Bulanek, A. Kaluzova, M. Setnicka, A. Zukal, P. Cicmanec, J. Mayerova // *Catalysis Today*. – 2012. – Vol. 179. – P. 149–158. DOI: 10.1016/j.cattod.2011.08.044.
15. Mishanin I., Bogdan V.I. In situ CO₂ reactivation of FeCrO_x/C catalyst in the oxidative dehydrogenation of ethane to ethylene // *Mendeleev Communications*. – 2020. – Vol. 30. – P. 359–361. DOI: 10.1016/j.mencom.2020.05.033.
16. Окислительное дегидрирование этана в присутствии CO₂ на катализаторах CrO_x/SiO₂ / А.Н. Иващенко, М.А. Тедеева, К.Е. Картавова, Т.Р. Аймалетдинов, П.В. Прибытков, А.Л. Кустов // *Журнал физической химии*. – 2021. – Т. 95. – № 12. – С. 1850–1854. DOI: 10.31857/S0044453721120104.
17. Дегидрирование пропана в присутствии CO₂ на нанесенных монометаллических MO_y/SiO₂ и биметаллических катализаторах CrO_xMO_y/SiO₂ (M = Fe, Co, Ni) / М.А. Тедеева, А.Л. Кустов, П.В. Прибытков, А.А. Стрекалова, К.Б. Калмыков, С.Ф. Дунаев, Л.М. Кустов // *Журнал физической химии*. – 2021. – Т. 95. – № 1. – С. 40–47. DOI: 10.31857/S0044453721010295.
18. Erdali A.D., Cetinyokus S., Dogan M. Investigation of isobutane dehydrogenation on CrO_x/Al₂O₃ catalyst in a membrane reactor // *Chemical Engineering and Processing. – Process Intensification*. – 2022. – Vol. 175. – P. 108904–108921. DOI: 10.1016/j.cej.2019.122741.
19. Effect of Sn on isobutane dehydrogenation performance of Ni/SiO₂ catalyst: adsorption modes and adsorption energies of isobutane and isobutene / Q. Zhu, G. Wang, J. Liu, L. Su, C. Li // *ACS Applied Materials & Interfaces*. – 2017. – Vol. 9. – P. 30711–30721. DOI: 10.1021/acsami.7b09482.
20. Synergy effect between Zr and Cr active sites in binary CrZrO_x or supported CrO_x/LaZrO_x: Consequences for catalyst activity, selectivity and durability in non-oxidative propane dehydrogenation / T.P. Otroshchenko, U. Rodemerck, D. Linke, E.V. Kondratenko // *Journal of Catalysis*. – 2017. – Vol. 356. – P. 197–205 DOI: 10.1016/j.jcat.2017.10.012.

Информация об авторах

Никита Сергеевич Скрипаль, старший оператор научной роты, Военный Инновационный Технополис «ЭРА», Россия, 353456, г. Анапа, Пионерский пр., 41; era_lab2@mil.ru

Никита Сергеевич Королев, старший оператор научной роты, Военный Инновационный Технополис «ЭРА», Россия, 353456, г. Анапа, Пионерский пр., 41; era_lab2@mil.ru

Поступила в редакцию: 10.04.2024

Поступила после рецензирования: 24.04.2024

Принята к публикации: 24.01.2025

REFERENCES

1. Farsi M., Jahanmiri A., Rahimpour M.R. Optimal operating conditions of radial flow moving-bed reactors for isobutane dehydrogenation. *Journal of Energy Chemistry*, 2013, vol. 22, pp. 633–638. DOI: 10.1016/S2095-4956(13)60083-2.
2. Liu J., Zhou W., Jiang D., Wu W., Miao C., Wang Y., Ma X. Isobutane dehydrogenation over InPtSn/ZnAl₂O₄ catalysts: effect of indium promoter. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2018, vol. 57, pp. 11265–11270. DOI: 10.1021/acs.iecr.8b01728.
3. Melnikov D.P., Novikov A.A., Glotov A.P., Reshetina M.V., Smirnova E.M., Wang H.Q., Vinokurov V.A. Dehydration of light alkanes (review). *Petrochemistry*, 2022, vol. 62, no. 6, pp. 773–796. (In Russ.) DOI: 10.31857/S0028242122060028.
4. Kustov L.M., Kucherov A.V., Finashina E.D. Oxidative dehydrogenation of C₂–C₄ alkanes into alkenes: Conventional catalytic systems and microwave catalysis. *Russian Journal of Physical Chemistry A*, 2013, vol. 87, pp. 345–351. DOI: 10.1134/S0036024413030151.
5. Plate N.V., Slivinsky E.V. *Fundamentals of chemistry and technology of monomers*. Moscow, Nauka, MAIK Nauka/Interperiodica, 2002. 696 p. (In Russ.)
6. Matveyeva A.N., Zaitseva N.A., Maki-Arvela P., Aho A., Bachina A.K., Fedorov S.P., Murzin D.Y., Pakhomov N.A. Fluidized-bed isobutane dehydrogenation over alumina-supported Ga₂O₃ and Ga₂O₃–Cr₂O₃ catalysts. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2018, vol. 57, pp. 927–938. DOI: 10.1021/acs.iecr.7b04571.

7. Im J., Choi M. Physicochemical stabilization of Pt against sintering for a dehydrogenation catalyst with high activity, selectivity, and durability. *ACS Catalysis*, 2016, vol. 6, pp. 2819–2826. DOI: 10.1021/acscatal.6b00329.
8. Hu Z., Yang D., Wang Z., Yuan Z. State-of-the-art catalysts for direct dehydrogenation of propane to propylene. *Chinese Journal of Catalysis*, 2019, vol. 40, pp. 1233–1254. DOI: 10.1016/S1872-2067(19)63360-7.
9. Matveyeva A. N., Wärnå J., Pakhomov N. A., Murzin D. Yu. Kinetic modeling of isobutane dehydrogenation over Ga₂O₃/Al₂O₃ catalyst. *Chemical Engineering Journal*, 2020, vol. 381, pp. 122741–122750. DOI: 10.1016/j.cej.2019.122741.
10. Nazimov D.A., Klimov O.V., Danilova I.G., Trukhan S.N., Saiko A.V., Cherepanova S.V., Chesalov Y.A., Martyanov O.N., Noskov A.S. Effect of alumina polymorph on the dehydrogenation activity of supported chromia/alumina catalysts. *Journal of Catalysis*, 2020, vol. 391, pp. 35–47. DOI: 10.1016/j.jcat.2020.08.006.
11. Nazimov D.A., Klimov O.V., Saiko A.V., Noskov A.S. Effect of steam-air treatment of alumina-chromia dehydrogenation catalysts on their physicochemical and catalytic characteristics. *Russian Journal of Applied Chemistry*, 2021, vol. 94, pp. 1283–1291. DOI: 10.1134/S1070427221090111.
12. Nesterenko N.S., Ponomoreva O.A., Yuschenko V.V., Ivanova I.I., Testa F., Di Renzo F., Fajula F. Dehydrogenation of ethylbenzene and isobutane over Ga- and Fe-containing mesoporous silicas. *Applied Catalysis A: General*, 2003, vol. 254, pp. 261–272. DOI: 10.1016/S0926-860X(03)00488-5.
13. Botavina M.A., Martra G., Agafonov Yu.A., Gaidai N.V., Nekrasov N., Trushin D.V., Coluccia S., Lapidus A.L. Oxidative dehydrogenation of C₃–C₄ paraffins in the presence of CO₂ over CrO_x/SiO₂ catalysts. *Applied Catalysis A: General*, 2008, vol. 347, pp. 126–132. DOI: 10.1016/j.apcata.2008.05.037.
14. Bulanek R., Kaluzova A., Setnicka M., Zukal A., Cicmanec P., Mayerova J. Study of vanadium based mesoporous silicas for oxidative dehydrogenation of propane and n-butane. *Catalysis Today*, 2012, vol. 179, pp. 149–158. DOI: 10.1016/j.cattod.2011.08.044.
15. Mishanin I. I., Bogdan V.I. In situ CO₂ reactivation of FeCrO_x/C catalyst in the oxidative dehydrogenation of ethane to ethylene. *Mendeleev Communications*, 2020, vol. 30, pp. 359–361. DOI: 10.1016/j.mencom.2020.05.033.
16. Ivashchenko A.N., Tedeeva M.A., Kartavova K.E., Aimaletdinov T.R., Pribytkov P.V., Kustov A.L. Oxidative dehydrogenation of ethane in the presence of CO₂ on CrO_x/SiO₂ catalysts. *Journal of Physical Chemistry*, 2021, vol. 95, no. 12, pp. 1850–1854. DOI: 10.31857/S0044453721120104. (In Russ.)
17. Tedeeva M.A., Kustov A.L., Pribytkov P.V., Strekalova A.A., Kalmykov K.B., Dunayev S.F., Kustov L.M. Dehydrogenation of propane in the presence of CO₂ on applied monometallic MO_y/SiO₂ and bimetallic catalysts CrO_xMO_y/SiO₂ (M = Fe, Co, Ni). *Journal of Physical Chemistry*, 2021, vol. 95, no. 1, pp. 40–47. DOI: 10.31857/S0044453721010295. (In Russ.)
18. Erdali A.D., Cetinyokus S., Dogan M. Investigation of isobutane dehydrogenation on CrO_x/Al₂O₃ catalyst in a membrane reactor. *Chemical Engineering and Processing – Process Intensification*, 2022, vol. 175, pp. 108904–108921. DOI: 10.1016/j.cej.2019.122741.
19. Zhu Q., Wang G., Liu J., Su L., Li C. Effect of Sn on isobutane dehydrogenation performance of Ni/SiO₂ catalyst: adsorption modes and adsorption energies of isobutane and isobutene, *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2017, vol. 9, pp. 30711–30721. DOI: 10.1021/acsami.7b09482.
20. Otroshchenko T.P., Rodemerck U., Linke D., Kondratenko E.V. Synergy effect between Zr and Cr active sites in binary CrZrO_x or supported CrO_x/LaZrO_x: consequences for catalyst activity, selectivity and durability in non-oxidative propane dehydrogenation. *Journal of Catalysis*, 2017, vol. 356, pp. 197–205. DOI: 10.1016/j.jcat.2017.10.012.

Information about the authors

Nikita S. Skripal, Senior Operator, Scientific Company, Military Innovative Technopolis "ERA", 41, Pionersky avenue, Anapa, 353456, Russian Federation. era_lab2@mil.ru

Nikita S. Korolev, Senior Operator, Scientific Company, Military Innovative Technopolis "ERA", 41, Pionersky avenue, Anapa, 353456, Russian Federation. era_lab2@mil.ru

Received: 10.04.2024

Revised: 24.04.2024

Accepted: 24.01.2025

УДК 62-661.543.876
DOI: 10.18799/24131830/2025/2/4968
Шифр специальности ВАК: 25.00.36

Разработка экспериментальной методики прогнозирования стадии воспламенения аэровзвеси на основе визуализации видеофайлов процесса горения

А.И. Сечин¹, Ю.Ф. Патраков², И.Л. Мезенцева^{1✉}, А.А. Сечин¹

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

² Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН, Россия, г. Кемерово

✉ mezenцева@tpu.ru

Аннотация. Актуальность. Проблемы, возникающие при разработке топливных композитов и заключающиеся в определении оптимального соотношения горючих компонентов, решаются при исследовании их физико-химических и эксплуатационных свойств. Особое внимание необходимо уделять процессам воспламенения и горения аэровзвеси топливных составов. **Цель.** Реализация данных задач видится в разработке экспериментальной методики прогнозирования некоторых показателей углей и углеотходов на основе методологии анализа видеофайлов воспламенения аэровзвеси в виде графической визуализации процесса горения. **Методы.** Методика оценки и прогнозирования некоторых показателей углей и углеотходов, полученных на основе методологии анализа видеофайлов воспламенения аэровзвеси в виде графической визуализации процесса горения. **Результаты и выводы.** Получена зависимость прогнозной величины определения коэффициента избытка воздуха для углей и углеотходов. Разработана методология графической визуализации процесса горения аэровзвеси углей и углеотходов. Проведено исследование Кузнецкого угля марки Д, и даны описания его горения в случае сжигания в активных гидродинамических режимах. Разработанный метод оценки и прогнозирования некоторых показателей углей и углеотходов, полученных на основе методологии анализа видеофайлов воспламенения аэровзвеси в виде графической визуализации процесса горения, показал свою эффективность. Он показал хорошее распределение по всему объему пылеугольных частиц в газопылевом облаке, демонстрируя устойчивое и эффективное горение топливной системы. Конвективные потоки в реакционной камере не разрывают формирующийся фронт горения. Графическая визуализация процесса горения показала, что в процессе горения наблюдается минимальное время деструктивных процессов, происходящих в угольных частицах, что говорит об эффективном тепломассопереносе. Для исследуемой системы Кузнецкого угля марки Д оптимальные соотношения горючее–окислитель α составляет 1,25. Окислительные реакции в этом случае протекают в более короткое время, что характеризуется ростом давления в реакционном объеме.

Ключевые слова: коэффициент избытка воздуха, горение аэровзвесей, уголь, факел горения, холодное пламя

Для цитирования: Разработка экспериментальной методики прогнозирования стадии воспламенения аэровзвеси на основе визуализации видеофайлов процесса горения / А.И. Сечин, Ю.Ф. Патраков, И.Л. Мезенцева, А.А. Сечин // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 2. – С. 241–250. DOI: 10.18799/24131830/2025/2/4968

UDC 62-661.543.876
DOI: 10.18799/24131830/2025/2/4968

Development of an experimental method for predicting the ignition stage of an airborne suspension based on visualization of combustion video files

A.I. Sechin¹, Yu.F. Patrakov², I.L. Mezentseva^{1✉}, A.A. Sechin¹

¹ National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

² Federal Research Center of Coal and Coal Chemistry SB RAS, Kemerovo, Russian Federation

✉ mezenцева@tpu.ru

Annotation. Relevance. The problems arising in developing fuel composites and consisting in determining the optimal ratio of combustible components are solved in the study of their physicochemical and operational properties. Particular attention should be paid to ignition and combustion of the air suspension of fuel compositions. **Aim.** The implementation of these problems is seen in the development of an experimental technique for predicting some indicators of coals and coal waste based on the methodology of analyzing video files air suspension of ignition in the form of a graphical visualization of combustion. **Methods.** Technique for assessing and predicting some indicators of coals and coal waste obtained on the basis of the methodology of analyzing video files of air suspension ignition in the form of a graphical visualization of combustion. **Results and conclusions.** The authors have obtained the dependence of the predicted value for determining the air excess coefficient for coals and coal waste. They developed the methodology for graphical visualization of the combustion of coals and coal waste air suspension. The Kuznetsk coal of grade D was studied and its combustion was described in the case of combustion in active hydrodynamic modes. The developed method for assessing and predicting some indicators of coals and coal waste obtained on the basis of the methodology for analyzing video files of air suspension ignition in the form of graphical visualization of the combustion proved its effectiveness. It showed a good distribution of dust-coal particles in a gas-dust cloud throughout the volume, demonstrating stable and efficient combustion of the fuel system. Convective flows in the reaction chamber do not break the forming combustion front. Graphic visualization of combustion showed that during this process, there is a minimum time of destructive processes occurring in coal particles. This indicates efficient heat and mass transfer. For the studied system of Kuznetsk coal of grade D, the optimal fuel-oxidizer ratio α is 1.25. Oxidation reactions in this case occur in a shorter time, which is characterized by an increase in pressure in the reaction volume.

Keywords: air excess coefficient, combustion of air suspensions, coal, combustion torch, cold flame

For citation: Sechin A.I., Patrakov Yu.F., Mezentsseva I.L., Sechin A.A. Development of an experimental method for predicting the ignition stage of an airborne suspension based on visualization of combustion video files. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 2, pp. 241–250. DOI: 10.18799/24131830/2025/2/4968

Введение

Проблемы, возникающие при разработке топливных композитов и заключающиеся в определении оптимального соотношения горючих компонентов, решаются при исследовании их физико-химических и эксплуатационных свойств. Особое внимание необходимо уделять процессам воспламенения и горения аэрозвеси топливных составов.

Работа котельных агрегатов предъявляет ряд специфических требований как к известному топливу, так и к вновь разрабатываемым топливным композитам, производство которых сопряжено с экономическими и экологическими требованиями. Успешное решение данной задачи видится в исследовании физико-химических и эксплуатационных свойств топлив и топливных композитов. При этом необходимо уделять особое внимание процессам воспламенения и горения аэрозвеси топливных составов. Ряд зарубежных авторов [1, 2] предлагает совместное сжигание угля и метанола либо угля вместе с отходами биомассы, что, по их мнению, позволяет снизить влияние топливной промышленности на окружающую среду, а также подобрать методы сжигания, обеспечивающие технически и экономически рациональные варианты для угольных электростанций [3, 4].

Реализация данных задач видится в разработке экспериментальной методики прогнозирования некоторых показателей углей и углеотходов на основе методологии анализа видеофайлов воспламенения аэрозвесей в виде графического отображения процесса горения.

Методика исследования и результаты

Уголь, являясь полифункциональным ресурсом, широко используется в целом ряде отраслей народного хозяйства. Различают три основных вида углей: антрацит, бурый и каменный [5].

Уголь, идущий на сжигание в топочных устройствах факельного типа, проходит предварительную подготовку и при дисперсности до 300 мкм он имеет уже другие характеристики.

Традиционно сжигание топлива осуществляется путем подачи угля в виде пылевоздушной смеси в топку котельного агрегата при коэффициенте избытка воздуха α от 0,9 до 1,4 [6, 7].

Установлено [8], что коэффициент избытка топлива α определяется для поддержания следующих показателей:

- качественного соотношения при смешении топлива и воздуха;
- снижения тепловых потерь с отходящим дымовым газом;
- более высокой полноты сгорания топлива, что минимизирует образование сажи и копоти в камере сгорания и снижает перерасход топлива, т. к. из практики известно [8] что каждый вид топливо-сжигающей установки имеет свой коэффициент избытка воздуха (например для трубчатых печей α составляет 1,1–1,4).

Выбор необходимой величины избытка воздуха определяется конструктивными характеристиками топочного устройства [8–10]. Установлено, что увеличение α ускоряет процесс сжигания горючего газа в горелках, а при недостатке воздуха и плохом смешении кислорода с газом происходит неполное

сгорание. Также практика установила [9], если невозможно определить коэффициент избытка кислорода α по балансу азота, исходят из более общего вывода. Считается [9], что если α меньше единицы, в топливной смеси наблюдается недостаток кислорода, а при α большей единицы топливная система содержит избыток кислорода. Когда $\alpha=1$, топливная система соответствует стехиометрическому соотношению составных частей данного топлива и окислителя, что обеспечивает полное ее сжигание.

В классическом представлении [9] отношение действительного расхода воздуха V_d , подаваемого на сжигание топлива, к его теоретическому значению V_o и называют коэффициентом избытка (расхода) воздуха:

$$\alpha = V_d / V_o.$$

Рассмотрим подробнее коэффициент избытка воздуха α – это многопараметрический показатель, теоретическое определение которого в настоящий момент весьма затруднительно. А вот экспериментальное определение коэффициента избытка воздуха α для некоторого пылевидного топлива – вполне реализуемая задача.

Проведем анализ установки, представленной в работах [11, 12].

Рассуждения строим с учетом того, что коэффициент избытка воздуха α традиционно от 0,9 до 1,2. Также считается [9], что для сжигания 1 кг топлива необходимо 3,6 м³ воздуха.

Следовательно, при формировании пылевого облака с угольной навеской в 1000 мг необходимо иметь экспериментальный реакционный объем в 3,6 л. В этом случае коэффициент избытка воздуха $\alpha=1$. Другими словами на 1 г угля нужно 4,41 г воздуха (барометрическое давление 760 мм. рт. ст. и температуре +15 °С).

Необходимо установить область, которая формируется геометрией реакционного объема при создании в ней аэровзвеси в условиях $\alpha=0,9-1,2$.

При данных атмосферных условиях 1 м³ воздуха весит 1,225 кгс [13].

Принято, что отношение количества окислителя к количеству топлива в процессе сжигания или в горючей смеси топливо–окислитель измеряют либо в виде отношения масс, либо в отношении объемов, либо в отношении количества молей [13, 14]. Соответственно, различают массовое L_o , объемное L_v и молярное L_M отношения:

$$L_o = m_o / m_f, L_v = V_o / V_f, L_M = M_o / M_f.$$

где m_o , m_f – массы окислителя и топлива; V_o , V_f – объемы окислителя и топлива; M_o , M_f – молярное количество окислителя и топлива (число молей).

Рассуждения строим с соотношением $L_o = m_o / m_f$, L_o – отношение количества окислителя к количеству топлива в процессе сжигания, как коэффици-

ент избытка воздуха $\alpha=1=4,41$ г/1 г. То есть полученный коэффициент α делим на 4,41.

Тогда m_o – масса окислителя, г. Принимаем 4,41 г (это 3,6 л); m_f – масса топлива, г. Принимаем 1,0 г (это 1000 мг). Имеем, что при зажигании навески в 1000 мг необходим реакционный объем в 3,6 л. В этом случае коэффициент избытка воздуха $\alpha=1$. Или на 1 г угля нужно 4,41 г воздуха. Строим таблицу расчетных соотношений коэффициента избытка воздуха для экспериментальной установки с объемом реакционной камеры 4,5 л, принимая среднюю плотность угля 1300 кг/м³ (табл. 1) или 1,3 кг/л, или 1,3 г/см³, и массу одного литра воздуха 1,225 г. В данном случае варьируем массовым содержанием угля, а не воздуха.

Таблица 1. Расчетные соотношения коэффициента избытка воздуха для экспериментальной установки с объемом реакционной камеры 4,5 л и средней плотности угля 1300 кг/м³

Table 1. Calculated ratios of the air excess coefficient for an experimental setup with a reaction chamber volume of 4.5 l and an average coal density of 1300 kg/m³

Коэффициент избытка воздуха, α Excess air coefficient, α	Масса угля m_f , г Coal mass m_f , g	Характер топливной смеси Fuel mixture character
1,56	0,8	Бедная/Unenriched
1,39	0,9	
1,25	1,0	
1,14	1,1	
1,042	1,2	Стехиометрия Stoichiometry
0,96	1,3	Богатая/Enriched
0,89	1,4	
0,83	1,5	

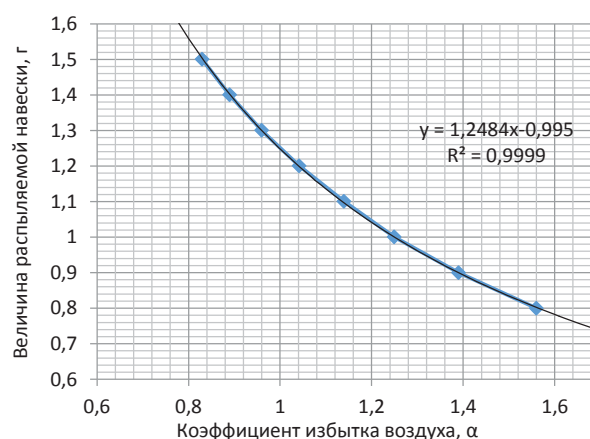


Рис. 1. График зависимости величины распыляемой навески в реакционном объеме 4,5 л от коэффициента избытка воздуха α при средней плотности угля 1300 кг/м³

Fig. 1. Graph of the dependence of the sprayed sample size in a reaction volume of 4.5 l on the air excess coefficient α at an average coal density of 1300 kg/m³

По полученным данным (табл. 1) строим график зависимости величины распыляемой навески в реакционном объеме от коэффициента избытка воздуха α .

Полученная зависимость позволяет отображать прогнозные величины коэффициента избытка воздуха α , согласованные с экспериментальными данными горения аэровзвесей угольной пыли. Далее проведем анализ полученных результатов на экспериментальном стенде.

Графическое отображение процесса горения аэровзвесей

При анализе полученных видеофайлов горения аэровзвесей возникла необходимость разработки методологии анализа видеофайлов воспламенения аэровзвесей в виде графического отображения процесса горения. Это позволяет более четко фиксировать время индукции процесса зажигания, длительность и характер горения, а также отображать параметрические характеристики пламени. Что позволит обосновано выбрать как температуру зажигания факела, так и другие параметры.

Известно, что время пребывания частицы в топке составляет 1–3 с. При факельном сжигании твердого топлива применяют пыль тонкого помола с размером частиц от 50–60 мкм (антрацит, тощие угли) до 150–200 мкм (бурые угли, торф) [8]. Как видно, оптимальный размер частиц тем меньше, чем меньше выход летучих веществ.

Для подсушки топлива, повышения температурного уровня в топке и интенсификации процесса сжигания применяют подогрев воздуха, идущего на горение. При сжигании высоковлажных бурых углей, а также антрацита и тощих углей воздух подогревают до 350–400 °С. При сжигании сухих каменных углей – до 250–300 °С [8, 9]. Эти характеристики учитываются при выборе вида топки.

Авторы [11, 12] пытались оценить время горения газовой фазы при факельном распылении и время горения твердой частицы. Они оказались не сопоставимы. Выяснилось, что частичка угля диаметром 100–200 мкм за время проведения опыта успевает только выделить летучие компоненты. Оставшаяся твердая фаза, представляющая собой коксовый остаток, не успевает сгореть за 0,5 с.

Согласно [7, 14], горение летучих происходит непосредственно вблизи поверхности твердой частицы, а выделяемая теплота влияет на ее прогрев и воспламенение. Следовательно, чем выше выход летучих веществ из частицы, тем лучше происходит ее подготовка к сжиганию [15].

В работах [7, 16] показано, что в зоне ядра факела диффузионные процессы являются определяющими и это является основанием при формировании пылеугольных облаков для изучения процесса

горения в условиях максимума диффузионных процессов в реакционном объеме и минимума турбулентного влияния. Что и положено в основу экспериментального устройства авторов, усовершенствовавших идею предшественников [11, 12].

При переходе материального потока из зоны ядра факела в зону догорания и охлаждения происходит изменение как кинетических, так и диффузионных условий горения [8, 16]. Константа скорости химической реакции k уменьшается вследствие понижения температуры, а коэффициент диффузионного массообмена α_d – вследствие уменьшения турбулентности газового потока [13, 14]. В зависимости от конкретных условий в зоне дожигания и охлаждения могут наблюдаться различные условия реагирования [7].

В остальной части топочного пространства в условиях снижения концентрации горючего и окислителя, повышения количества продуктов горения и слабой турбулизации материального потока происходит догорание угольных частиц. В этой зоне создается такой аэродинамический режим, который позволяет повысить интенсивность горения, распространяя его на весь объем топочной камеры [8].

В зоне ядра факела горение протекает при высокой температуре (1400–1600 °С) [8]. Кинетическое уравнение гетерогенного горения частицы кокса имеет вид [13]

$$W = Co_2^0 / (1/\alpha_d + 1/k),$$

где W – скорость реакции гетерогенного горения (количество кислорода, потребляемое единицей реакционной поверхности за единицу времени), моль/(м²·с); Co_2^0 – концентрация кислорода в объеме, окружающем частицу, моль/м³; α_d – коэффициент диффузионного массообмена, м²/с; k – константа скорости химической реакции, м²/с.

Константа скорости химической реакции, имеющая экспоненциальную зависимость от температуры, при высокой температуре в зоне ядра факела горения, достигающей 1400–1600 °С, приобретает очень высокое значение [13]. В этой же зоне вследствие высокой концентрации горючего и окислителя и повышенной турбулизации потока коэффициент диффузионного массообмена α_d также будет максимальным [7, 17]. С учетом низкой относительной скорости движения частиц в потоке его абсолютная величина будет сравнительно невелика и $\alpha_d \gg k$. Следовательно, диффузионные процессы в зоне ядра факела являются определяющими для горения пылеугольного факела.

Рассматривая зону догорания и охлаждения как последующую зону ядра факела, можно наблюдать изменение как кинетических, так и диффузионных условий горения. Поэтому могут наблюдаться и различные условия реагирования [17].

Таблица 2. Схема горения угольной пыли в топочной камере

Table 2. Scheme of coal dust combustion in the combustion chamber

Зона подготовки топлива и воздуха Fuel and air preparation area	Горелочное устройство Burner device	Объем топочной камеры с горящим факелом. Частица в зоне горения пребывает 1–3 с. Volume of the combustion chamber with a burning torch. The particle remains in the combustion zone for 1–3 s.		
		Начальный участок Initial section	Зона ядра горения Combustion core zone	Зона догорания и охлаждения Afterburning and cooling zone
Размол, нагрев воздуха Grinding, heating of air Тонкий помол от 50–60 мкм (антрацит, тощие угли) до 150–200 мкм (бурые угли, торф) Fine grinding from 50–60 microns (anthracite, lean coals) to 150–200 microns (brown coals, peat)	Прогрев топлива до 350–400 °С (антрацит, тощие угли) до 250–300 °С (бурые угли и торф) Heating the fuel to 350–400 °С (anthracite, lean coals) to 250–300 °С (brown coals and peat) Смешение, концентрация пыли в факеле, 20–30 г в 1 м ³ Mixing, dust concentration in the torch, 20–30 g in 1 m ³	Протяженность Length 0,6–1 м Инициирование процесса горения Combustion initiation	20–30 % объема топочной камеры 20–30% of the combustion chamber volume Сгорание топлива Fuel combustion Выделение 85–90 % теплоты топлива Release of 85–90% of fuel heat Температура 1400–1600 °С Temperature 1400–1600 °С	Происходит изменение как кинетических, так и диффузионных условий горения There is a change in both kinetic and diffusion conditions of combustion Турбулентность во всем объеме топочной камеры Turbulence throughout the entire combustion chamber Происходит догорание частиц кокса Coke particles are burning out Температура газов в зоне догорания понижается Temperature of gases in the combustion zone decreases
Индикаторы горения Burning indicators		0,5; 3; 5;	4; 5; 6;	2; 3; 4; 5; 0,5; 0;

Для эффективного сжигания топлива большое значение имеет время индукции процесса зажигания частиц топлива. С целью обоснования индикаторов интенсивности горения аэровзвеси угольной пыли в реакционном объеме от времени протекания процесса с опорой на характеристики горения угольной пыли рассмотрим этапы горения угольной пыли в топочной камере (табл. 2).

Основываясь на опыте многолетних наблюдений процессов горения аэровзвесей на установке определения критических условий [11, 12] и руководствуясь методическими указаниями [18], предлагается для оценки уровня интенсивности горения аэровзвесей в реакционном объеме ввести оценочную индикаторную шкалу распространения фронта горения. Данная шкала представлена в табл. 3.

Данная шкала применяется при оценке кадров видеофайлов горения аэровзвеси. При анализе кадров им присваивается величина индикатора уровня интенсивности горения. Время определяется по таймеру видеофайла.

По полученным данным строим зависимость интенсивности взрывного горения аэровзвеси (рис. 2) в реакционном объеме от времени протекания процесса на примере горения угля марки Д фракции до 100 мкм.

Угольная пыль отличается полифракционным составом с частицами различных размеров [19, 20]. Горение угольных частиц в факеле начинается с мелких фракций. Выделяемая при этом теплота

ускоряет прогрев более крупных фракций, но их горение завершается в зоне, где значительная часть кислорода уже израсходована [7, 21]. Поэтому горение крупных фракций сопровождается потерями теплоты от механического недожога частиц кокса, уносимых из топки дымовыми газами.

Образцом для исследования служил уголь марки Д. Проведем анализ интенсивности взрывного горения аэровзвеси угля в реакционном объеме.

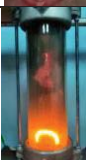
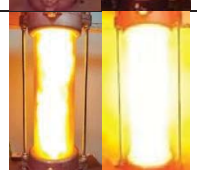


Рис. 2. Зависимость интенсивности взрывного горения аэровзвеси в реакционном объеме от времени протекания процесса

Fig. 2. Dependence of the intensity of air suspension explosive combustion in the reaction volume on the time of the process

Таблица 3. Индикаторная шкала уровня интенсивности горения аэровзвеси в реакционном объеме

Table 3. Indicator scale of the combustion intensity level of airborne particles in the reaction volume

Величина индикатора уровня интенсивности горения, I Value of the combustion intensity level indicator, I	Описание характера горения в экспериментальном объеме Description of the combustion nature in the experimental volume	Вид горения аэровзвеси в реакционном объеме Type of air suspension combustion in the reaction volume
0	Запуск экспериментального процесса Launch of the experimental process	
	Горения не наблюдается No combustion is observed	
0,5	Инициирование процесса горения в реакционной камере Combustion initiation in the reaction chamber	
	Гашение пламени в реакционном сосуде после завершения горения Extinguishing the flame in the reaction vessel after combustion is complete	
1	Горение в зоне источника зажигания, облако горения, не превышающее 7 см от источника зажигания. Холодное пламя: начало горения; при завершении горения Combustion in the ignition source zone, combustion cloud not exceeding 7 cm from the ignition source. Cold flame: beginning of combustion; at the end of combustion	
2	Дробление фронта пламени. Очаговое холоднопламенное горение. Наблюдаются: дробление, не перерастающее во взрыв; дробление, перерастающее во взрыв Flame front fragmentation. Focal cold flame combustion. Observed: fragmentation that does not develop into an explosion; fragmentation that develops into an explosion	
3	Распространение фронта горения на 2/3 объема реакционного сосуда. Холодное пламя. Наблюдаются: развитие горячего пламени; развитие холодного пламени; стадия завершения горения Spread of combustion front over 2/3 of the reaction vessel volume. Cold flame. Observed: development of hot flame; development of cold flame; stage of combustion completion	
4	Фронт пламени носит очаговый характер горения по всему объему реакционного сосуда без роста давления. Холодное пламя Flame front has a focal combustion character throughout the entire volume of the reaction vessel without pressure increase. Cold flame	
5	Распространение фронта горения по всему объему реакционного сосуда без роста давления. Холодное пламя Spread of combustion front throughout the entire volume of the reaction vessel without pressure increase. Cold flame	
6	Распространение фронта горения по всему объему реакционного сосуда с ростом давления Spread of the combustion front throughout the entire volume of the reaction vessel with increasing pressure	

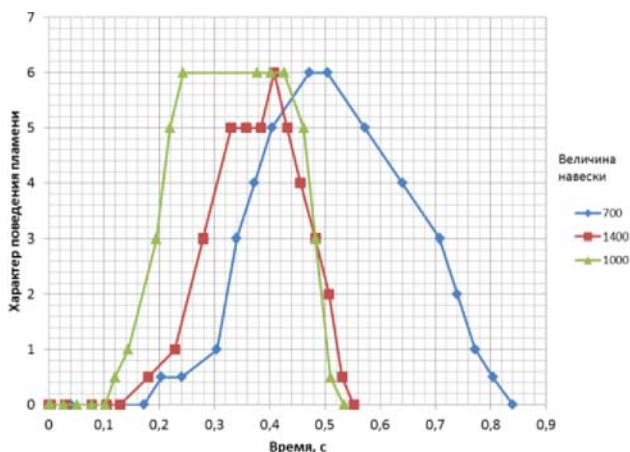


Рис. 3. Зависимость интенсивности взрывного горения аэрозвеси угля в реакционном объеме от времени протекания процесса и величины навески

Fig. 3. Dependence of the intensity of coal air suspension explosive combustion in the reaction volume on the process duration and the sample size

Горение навески 1400 мг

Анализ процесса горения аэрозвеси (рис. 3, красная линия) показывает, что в эксперименте зафиксирован процесс перехода холоднопламенного горения в горячий.

Мы наблюдаем динамично и быстро развивающийся процесс с временем индукции 0,12 с, проходящий фазу воспламенения и развития горения за 0,18 с. Развитие холоднопламенного горения происходит за 0,1 с и с его протяженностью в 0,05 с. Затем кратковременно горение переходит в горячий режим протяженностью в 0,05 с. В этот период не наблюдается очагового горения, характеризующего наличие диффузионных процессов. Процесс завершения и прекращения горения составляет 0,1 с. Полное время горения составляет 0,35 с.

Коэффициент избытка воздуха α в данных условиях проведения опытов, согласно рис. 1, составляет 0,89. Это говорит о том, что смесь сильно богата топливом, горение осуществляется в режиме недостатка окислителя.

Горение навески 1000 мг

Анализируя горение навески в 1000 мг, можно сделать вывод, что горение осуществляется исключительно в газовой фазе. Продолжительность горения аэрозвеси составляет 0,43 с. Наблюдается динамично и быстро развивающийся процесс с временем индукции 0,1 с, проходящий фазу воспламенения и развития горения за 0,12 с. Затем горение переходит в горячий режим с удержанием высокой температуры протяженностью в 0,19 с. В рассматриваемый период не наблюдается очагового горения, характеризующего наличие диффузионных процессов. Процесс завершения и прекращения

горения составляет 0,08 с, из которого на холоднопламенное горение отводится 0,03 с.

Коэффициент избытка воздуха α в данных условиях проведения опытов, согласно рис. 1, составляет 1,25. Это говорит о том, что топливная смесь находится в близком соотношении к стехиометрии топлива и окислителя, горение осуществляется в наиболее благоприятном режиме.

Горение навески 700 мг

При горении аэрозвеси массой 700 мг мы наблюдаем процесс перехода холоднопламенного горения в горячий. Продолжительность горения аэрозвеси составляет 0,47 с, а время индукции — 0,17 с, что говорит о большом избытке окислителя. По истечении 0,2 с происходит зажигание пылевого облака и еще 0,04 с идет его развитие, в это время накапливаются продукты пиролиза и еще 0,06 с наблюдается горение в области источника зажигания. Затем мы наблюдаем распространение пламени по всему объему за 0,17 с, это холоднопламенное горение. Оно поднимается до уровня 6 по индикатору интенсивности горения, но протекает без роста давления, что характеризуется низким уровнем термохимических реакций, протекающих в реакционном объеме, а большие тепловые потери во фронте пламени не дают возможности развития очага горения.

Коэффициент избытка воздуха α в данных условиях, согласно рис. 1, составляет более 1,6. В смеси топлива и окислителя значительный избыток окислителя, горение осуществляется в наиболее неблагоприятном режиме для топливных агрегатов. Это режимы определения концентрационных пределов взрываемости пылеобразующих материалов.

Анализируя данные, представленные на рис. 3, мы видим, что лучше всех горит пылевое облако с количеством твердой фазы в 1000 мг. Это может говорить о следующем:

- в газопылевом облаке пылевые частицы равномерно распределились по всему объему, система состоит из оптимального соотношения горючее–окислитель, α составляет 1,25. Согласно [7, 11, 12, 14, 16, 21, 22], мы имеем устойчивое и эффективное горение топливной системы;
- в процессе горения наблюдается минимальное время деструктивных процессов, происходящих в угольных частицах, что говорит об эффективном тепломассопереносе;
- конвективные потоки в реакционной камере не разрывают формирующийся фронт горения;
- окислительные реакции в топливной системе протекают в более короткое время;
- термический баланс системы характеризуется ростом давления взрыва, что и наблюдалось в работе [23, 24].

Если все время процесса горения определилось как 0,43 с, то активная фаза горения составила 0,18 с, а если к характеру поведения пламени отнести и индикатор 5 уровня, то время горения составит 0,24 с, что на 0,19 с больше времени процесса подготовки и завершения горения. Этот анализ убеждает нас во взрывном режиме горения системы, которое условно относится к горячим пламенам [7, 11, 12, 14, 16, 21, 22].

Другие концентрации (1400 и 700) горят в пределах холоднопламенного горения с отклонениями по задержке горения и суммарной тепловой производительности. Следует полагать, что данные условия являются оптимальными для сжигания угля этой марки.

Заключение

Разработанный метод оценки и прогнозирования некоторых показателей углей и углеотходов, полученных на основе методологии анализа ви-

деофайлов воспламенения аэрозвеси в виде графической визуализации процесса горения, показал свою эффективность. Он показал хорошее распределение по всему объему пылеугольных частиц в газопылевом облаке, демонстрируя устойчивое и эффективное горение топливной системы. Конвективные потоки в реакционной камере не разрывают формирующийся фронт горения.

Графическая визуализация процесса горения показала, что в процессе горения наблюдается минимальное время деструктивных процессов, происходящих в угольных частицах, что говорит об эффективном тепломассопереносе. Для исследуемой системы Кузнецкого угля марки Д оптимальное соотношения горючее–окислитель α составляет 1,25. Окислительные реакции в этом случае протекают в более короткое время, что характеризуется ростом давления в реакционном объеме.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Experimental study of NO emission in coal-methanol co-combustion under air-staged condition / Jun Chen, Xin Wang, Weidong Fan, Tingjiang Liu, Yong Wang, Wei Geng // *Journal of the Energy Institute*. – 2024. – Vol. 117. – P. 101835. DOI: 10.1016/j.joei.2024.101835
2. Experimental study of the influence of synergistic effects on the co-firing characteristics of biomass and coal / Yang Pu, Haofan Wang, Xianhua Wang, Mooktzeng Lim, Bin Yao, Haiping Yang, Chun Lou // *Journal of the Energy Institute*. – 2024. – Vol. 115. – P. 101687. DOI: 10.1016/j.joei.2024.101687
3. Role of biomass as low-carbon energy source in the era of net zero emissions / Changwon Yang, Hyunmin Kwon, Byeongryeol Bang, Soohwa Jeong, Uendo Lee // *Fuel*. – 2022. – Vol. 328. – P. 125206. DOI: 10.1016/j.fuel.2022.125206
4. Technical-economic-environmental analysis of biomass direct and indirect co-firing in pulverized coal boiler in China / Wenyu Mo, Kuan Du, Yi Sun, Minruo Guo, Chao Zhou, Mo You, Jun Xu, Long Jiang, Yi Wang, Sheng Su, Song Hu, Jun Xiang // *Journal of Cleaner Production*. – 2023. – Vol. 426. – P. 139119. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.139119
5. ГОСТ 17070-2014 Угли. Термины и определения. Технические требования. Введ. 2016-04-01 – М.: Стандартинформ, 2015. – 29 с.
6. Копань А.В., Клейнерман В.А. Тестирование технических решений по топочно-горелочным устройствам в составе низкокиссионной системы сжигания кузнецкого угля // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2021. – Т. 332. – № 4. – С. 140–147. DOI: 10.18799/24131830/2021/4/3157
7. Математическая теория горения и взрыва / Я.Б. Зельдович, Г.И. Баренблатт, В.Б. Либрович, Г.М. Махвиладзе – М.: Наука. 1980. – 478 с.
8. Сидельковский Л.Н., Юренев В.Н. Котельные установки промышленных предприятий. 4-е изд., репр. – М.: Бастет, 2009. – 528 с.
9. СП 89.13330.2016. Свод правил. Котельные установки. URL: <https://docs.cntd.ru/document/456054199> (дата обращения 10.01.2025).
10. Effect of excess air ratio and spark timing on the combustion and emission characteristics of turbulent jet ignition direct injection hydrogen engine / Yanfei Qiang, Shihao Zhao, Jinxing Yang, Jichun Cai, Fangxu Su, Shuofeng Wang, Changwei Ji // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2024. – Vol. 9. – P. 1166–1178. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2024.11.052
11. Сечин А.И., Патраков Ю.Ф., Сечин А.А. Методика экспериментального определения пределов распространения пламени по пылевоздушным смесям // *Горный журнал*. – 2017. – № 12. – С. 87–90.
12. Patrakov Y.F., Sechin A.I., Sechin A.A., Experimental range test of flame spread in dust-air mixtures // *Journal of Mining Science*. – 2019. – № 55. – P. 494–498. DOI: 10.1134/S106273911903582X
13. Справочник химика / под ред. Б.П. Никольского. 2 изд. – М.; Л.: Химия, 1964. – Т. 3. – 740 с.
14. Семенов Н.Н. Тепловая теория горения и взрывов // *Теория горения и взрыва*. – М.: Наука, 1981. – С. 33–140.
15. Совместное измельчение как фактор синергии при совместном обжиге. Тематическое исследование древесно-угольных смесей / А.Г. Матвеева, Ю.Ф. Патраков, А.И. Сечин и др. // *Преобразование углеродных ресурсов*. – 2023. – Т. 6. – изд. 1. – С. 51–57. DOI: 10.1016/j.crcon.2022.11.001
16. Гейдон А.Г., Вольфгард Х.Г. Пламя, его структура, излучение и температура / пер. с англ. / под ред. А.С. Соколика. – М.: Металлургия, 1959. – 333 с.
17. Производство и использование водоугольного топлива / В.Е. Зайденварг, К.Н. Трубецкой, В.И. Мурко, И.Х. Нехороший. – М.: Изд-во Академии горных наук, 2001. – 176 с.
18. ГОСТ 12.1.044-89. ССБТ. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы их определения. – М.: Издательство стандартов, 1990. – 144 с.

19. Романченко С.Б., Руденко Ю.Ф., Костеренко В.Н. Пылевая динамика в угольных шахтах. – М.: Горное дело, 2011. – 256 с.
20. Бойко Е.А., Страшников А.В. Обоснование практических рекомендаций по организации оптимальных режимов предварительной термической обработки и сжигания угля в пылевидном состоянии// Известия Российской академии наук. Энергетика. – 2022. – № 1. – С. 35–50. DOI: 10.31857/S000233102301003X
21. Кумагаи С. Горение / пер. С.К. Орджоникидзе, Б.С. Ермолаев. – М.: Химия, 1979. – 255 с.
22. Франк-Каменецкий Д.А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. – М.: Наука, 1967. – 491 с.
23. Зависимость между величиной воспламенения пневмоподвески и размером реакционной камеры / А.И. Сечин, А.А. Сечин, Ю.Ф. Патраков и др. // Серия конференций IOP: Материаловедение и инженерия. 14-й Международный форум по стратегическим технологиям (IFOST 2019). – 2021. – Т. 1019. – 012039, 6 с. DOI: 10.1088/1757-899X/1019/1/012039
24. Riaz J., Gibbins J., Chalmers H. Ignition and combustion of single particles of coal and biomass// Fuel. – 2017. – № 202. – P. 650–655. DOI: 10.1016/j.fuel.2017.04.011

Информация об авторах

Александр Иванович Сечин, доктор технических наук, профессор отделения контроля и диагностики Института неразрушающего контроля, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. sechin@tpu.ru

Юрий Федорович Патраков, доктор химических наук, заведующий лабораторией научных основ технологий обогащения угля, Федеральный исследовательский центр угля и углехимии, Сибирское отделение Российской академии наук, Россия, 650065, г. Кемерово, пр. Ленинградский, 10. yurat52@gmail.com

Ирина Леонидовна Мезенцева, старший преподаватель отделения контроля и диагностики Института неразрушающего контроля, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. mezenцева@tpu.ru

Андрей Александрович Сечин, кандидат технических наук, доцент отделения контроля и диагностики Института неразрушающего контроля, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. seanal@tpu.ru

Поступила в редакцию: 17.01.2025

Поступила после рецензирования: 28.01.2025

Принята к публикации: 03.02.2025

REFERENCES

1. Jun Chen, Xin Wang, Weidong Fan, Tingjiang Liu, Yong Wang, Wei Geng. Experimental study of NO emission in coal-methanol co-combustion under air-staged condition. *Journal of the Energy Institute*, 2024, vol. 117, pp. 101835. DOI: 10.1016/j.joei.2024.101835
2. Yang Pu, Haofan Wang, Xianhua Wang, Mooktzeng Lim, Bin Yao, Haiping Yang, Chun Lou. Experimental study of the influence of synergistic effects on the co-firing characteristics of biomass and coal. *Journal of the Energy Institute*, 2024, vol. 115, pp. 101687. DOI: 10.1016/j.joei.2024.101687
3. Changwon Yang, Hyunmin Kwon, Byeongryeol Bang, Soohwa Jeong, Uendo Lee. Role of biomass as low-carbon energy source in the era of net zero emissions. *Fuel*, 2022, vol. 328, pp. 125206. DOI: 10.1016/j.fuel.2022.125206
4. Wenyu Mo, Kuan Du, Yi Sun, Minruo Guo, Chao Zhou, Mo You, Jun Xu, Long Jiang, Yi Wang, Sheng Su, Song Hu, Jun Xiang. Technical-economic-environmental analysis of biomass direct and indirect co-firing in pulverized coal boiler in China. *Journal of Cleaner Production*, 2023, vol. 426, pp. 139119. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.139119
5. SS 17070-2014 *Coals. Terms and definitions. Technical requirements. Intro*. Moscow, Standartinform Publ., 2015. 29 p. (In Russ.)
6. Kopan A.V., Kleinerman V.A. Testing technical solutions for furnace and burner devices as part of a low-emission combustion system for Kuznetsk coal. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 4, pp. 140–147. (In Russ.) DOI: 10.18799/24131830/2021/4/3157
7. Zeldovich Ya.B., Barenblatt G.I., Librovich V.B., Makhviladze G.M. *Mathematical theory of combustion and explosion*. Moscow, Nauka Publ., 1980. 478 p. (In Russ.)
8. Sidelkovskiy L.N. *Boiler installations of industrial enterprises*. Moscow, Bastet Publ., 2009. 528 p. (In Russ.)
9. SP 89.13330.2016. *Code of Practice. Boiler Installations*. (In Russ.) Available at: <https://docs.cntd.ru/document/456054199> (accessed 10 January 2025).
10. Yanfei Qiang, Shihao Zhao, Jinxing Yang, Jichun Cai, Fangxu Su, Shuofeng Wang, Changwei Ji. Effect of excess air ratio and spark timing on the combustion and emission characteristics of turbulent jet ignition direct injection hydrogen engine. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2024, vol. 9, pp. 1166–1178. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2024.11.052
11. Sechin A.I., Patrakov Yu.F., Sechin A.A. Methodology for experimental determination of flame propagation limits for dust-air mixtures. *Mining Journal*, 2017, vol. 12, no. 12, pp. 87–90. (In Russ.)
12. Patrakov Y.F., Sechin A.I., Sechin A.A. Experimental range test of flame spread in dust-air mixtures. *Journal of Mining Science*, 2019, vol. 55, pp. 494–498. DOI: 10.1134/S106273911903582X
13. *Chemist's Handbook*. Ed. by B.P. Nikolsky Moscow, Khimiya Publ., 1964. 740 p. (In Russ.)

14. Semenov N.N. Thermal theory of combustion and explosions. *Theory of combustion and explosion*. Moscow, Nauka Publ., 1981. pp. 33–140. (In Russ.)
15. Matveeva A.G., Patrakov Yu.F., Sechin A.I. Co-milling as a synergy factor for co-firing. A case study of wood/coal blends. *Carbon Resources Conversion*, 2023, vol. 6, Iss. 1, pp. 51–57. (In Russ.) DOI: 10.1016/j.crcon.2022.11.001
16. Heidon A.G., Wolfhard H.G. *Flame, its structure, radiation and temperature*. Moscow, Metallurgiya Publ., 1959. 333 p. (In Russ.)
17. Zaidenvarg V.E., Trubetskoy K.N., Murko V.I., Nekhoroshy I.Kh. *Production and use of water-coal fuel*. Moscow, Academy of Mining Sciences Publ. House, 2001. 176 p. (In Russ.)
18. SS 12.1.044-89. *Fire and explosion hazard of substances and materials. Nomenclature of indicators and methods for their determination*. Moscow, Publ. House of Standards, 1990. 144 p. (In Russ.)
19. Romanchenko S.B., Rudenko Yu.F., Kosterenko V.N. *Dust dynamics in coal mines*. Moscow, Mining Publ., 2011. 256 p. (In Russ.)
20. Boyko E.A., Strashnikov A.V. Justification of practical recommendations for organizing optimal modes of preliminary thermal treatment and combustion of coal in a pulverized state. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Power Engineering*, 2022, vol. 1, pp. 35–50. DOI: 10.31857/S000233102301003X (In Russ.)
21. Kumagai S. *Combustion*. Moscow, Khimiya Publ., 1979. 255 p. (In Russ.)
22. Frank-Kamenetsky D.A. *Diffusion and heat transfer in chemical kinetics*. Moscow, Nauka publ., 1967. 491 p. (In Russ.)
23. Sechin A.I., Sechin A.A., Patrakov Yu.F. The dependence between the ignition value of air suspension and the size of the reaction chamber. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2021, vol. 1019, pp. 6. (In Russ.) DOI: 10.1088/1757-899X/1019/1/012039
24. Riza J., Gibbins J., Chalmers H. Ignition and combustion of single particles of coal and biomass. *Fuel*, 2017, vol. 202, pp. 650–655. DOI: 10.1016/j.fuel.2017.04.011

Information about the authors

Alexander I. Sechin, Dr. Sc., Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. sechin@tpu.ru

Yuri F. Patrakov, Dr. Sc., Federal Research Center for Coal and Coal Chemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 10, Leningradsky avenue, Kemerovo, 650065, Russian Federation. yupat52@gmail.com

Irina L. Mezentseva, Lecturer, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. mezentseva@tpu.ru

Andrey A. Sechin, Cand. Sc., Associate Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. seanal@tpu.ru

Received: 17.01.2025

Revised: 28.01.2025

Accepted: 03.02.2025

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 26.02.2025. Дата выхода журнала: 28.02.2025.
Формат 60х84/8 (А4). Бумага «Снегурочка».
Печать XEROX. Усл. печ. л. 29,20. Уч.-изд. л. 26,41.
Заказ 52-25. Тираж 500 экз. Цена свободная.



Издательство

ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Адрес учредителя, редакции, издателя, типографии:
634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

